

Manuel sur la fertilité du sol

Publication 611F



Manuel sur la fertilité du sol

Publication 611F



Manuel sur la fertilité du sol

Publication 611F, 3^e édition

Rédacteur

Jake Munroe, ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO)

Corédacteurs

Christine Brown, Christoph Kessel, Anne Verhallen, MAAARO

John Lauzon et Ivan O'Halloran, Université de Guelph

Tom Bruulsema, International Plant Nutrition Institute

Dale Cowan, AGRIS Co-operative Ltd

Contributeurs

Les rédacteurs tiennent à remercier les personnes suivantes des contributions qu'ils ont faites aux versions précédentes de la publication :

MAAARO — Doug Aspinall (retraité), Barb Lovell (retraitée), Michael Payne (retraité), Keith Reid (anciennement du MAAARO), Maribeth Fitts (anciennement du MAAARO), Donna Speranzini (anciennement du MAAARO), Janice LeBoeuf (anciennement du MAAARO), Ian McDonald et Ed Tomecek (retraités).

Université de Guelph — K.J. Janovicek, Laura Van Eerd

Jean Cheval, Sylvite Sales; Craig Drury et Tom Oloya, ministère de l'Agriculture et de l'Agroalimentaire (AAC); Wayne Izumi, Stoller Chemical; Mark Janiec, Terratech Environmental; Laura Neubrand, Hoegy's Farm Supply Ltd.; Dale Peters, Jim Brimmer et Gary Roberts, Stratford Agri-Analysis; John Rowsell, Université de Guelph; Burns Stephens, Norfolk Co-op; Tony Vyn, Université Purdue; Jerry Winnicki, Clark Agri-Service Inc.

Images de couverture

PAGE DE COUVERTURE:

arrière-plan : Champ de blé
petite image à gauche : Injection de fumier dans des cultures de couverture
petite image au centre : Essai à long terme de rotation des cultures et de travail du sol
petite image à droite : Champ de choux

COUVERTURE ARRIÈRE :

arrière plan : Champ de blé
petite image à gauche : Carotte de sol et seau d'échantillonnage
petite image au centre : Oignons récoltés au champ
petite image à droite : Récolte de céréales dans un wagon de gravité

Table des matières

Préface	xi	Fer	48
1. La nature des sols et la fertilité du sol		Molybdène	48
Horizons du sol	1	Nickel	49
Composants du sol	2	Minéraux non essentiels	49
Minéraux du sol	3	Minéraux bénéfiques	49
Eau du sol	3	Éléments indésirables	50
Air du sol	4	Références	51
Matière organique du sol	5	3. pH du sol, chaulage et acidification	
Interaction des composants du sol	5	pH du sol	53
2. Éléments nutritifs		pH et solubilité des métaux	54
Formes des éléments nutritifs	7	Facteurs influençant le pH du sol	55
Dissous dans la solution de sol	7	Matériau d'origine	55
Maintenus à la surface du sol	7	Acidification du sol	57
Fixés à la matière organique	10	Précipitations	57
Retenus comme composés insolubles	11	Décomposition de la matière organique	57
Fixés dans les argiles	11	Épandage d'engrais	57
Transport des éléments nutritifs vers les racines	11	Alcalinisation du sol	57
Interception racinaire	12	Traitement des sols à pH élevé	58
Écoulement de masse	15	Symptômes de problèmes liés au pH	59
Diffusion	15	pH tampon	60
Prélèvement des éléments nutritifs par les plantes	16	H ⁺ et sites d'échange cationique	60
Rôle des éléments nutritifs chez les végétaux	18	Réserve d'hydrogène	60
Éléments nutritifs primaires	19	Différences dans le pouvoir tampon	61
Azote	19	Mesure du pH tampon	61
Phosphore	25	Qualité de la pierre à chaux	63
Potassium	31	Valeur neutralisante	63
Éléments nutritifs secondaires	34	Indice granulométrique	64
Calcium	34	Chaux dolomitique ou calcitique	65
Magnésium	36	Chaux liquide	65
Soufre	38	Chaux granulaire	66
Oligo-éléments	41	Autres agents de chaulage	66
Zinc	43	Indice agricole	66
Manganèse	44	Chaulage	67
Bore	45	Épandage	67
Cuivre	46	Incorporation	67
Chlore	47	Temps de réaction	68
		Acidification du sol	69
		Réduction du pH du sol	69
		Sols pouvant être acidifiés	69
		Utilisation du soufre	70
		Références	71

4. Échantillonnage

Échantillonnage de sol	73
Prélèvement des échantillons	73
Variabilité des sols	76
Stratégies d'échantillonnage	78
Conditions d'échantillonnage particulières	80
Échantillonnage de tissus végétaux	82
Arbres fruitiers, petits fruits et vignes	82
Cultures de plein champ	83
Recommandations d'échantillonnage pour les cultures horticoles et les grandes cultures	84
Prélèvement d'échantillons de tissus à des fins de diagnostic	84
Échantillonnage du fumier	85
Échantillonnage du fumier liquide	85
Échantillonnage du fumier solide	85
La composition du fumier varie d'une ferme à l'autre	85
Échantillonnage pour diagnostiquer des carences et des toxicités dans le champ	86
Références	87

5. Analyses de sols, de tissus végétaux et de fumier

Analyses de sol	89
Manutention et préparation	89
Résultats d'une analyse de sol	89
Présentation des résultats	90
Agents d'extraction	92
Caractère non interchangeable des résultats obtenus avec des agents d'extraction différents	94
Contrôle de la qualité	94
pH du sol	96
pH tampon	97
Sels solubles	98
Dosage de l'azote des nitrates	99
Phosphore	100
Potassium, calcium, magnésium, sodium	102
Oligo-éléments	103
Matière organique	106

Détermination du carbone organique	107
Texture du sol	108
Capacité d'échange cationique et taux de saturation en bases	110
Matériel de laboratoire	112
Matières organiques (tissus végétaux et fumier)	113
Manutention et préparation	113
Azote	114
Calcium, phosphore, potassium, magnésium, manganèse, cuivre, fer, bore	115
Métaux réglementés dans les biosolides	115
Bibliographie	115
Information générale	115
Pour plus de détails	115

6. Sources organiques d'éléments nutritifs : fumier, biosolides, légumineuses

Éléments nutritifs tirés des matières d'épandage	117
Similitudes entre les matières	117
Différences entre les matières	118
Facteurs influençant la biodisponibilité des éléments nutritifs	127
Prévision de la biodisponibilité des éléments nutritifs dans les matières épandues	131
Planification de la gestion des éléments nutritifs	139
Préoccupations environnementales	142
Utilisation sécuritaire du fumier dans des quantités supérieures aux besoins de la culture	142
Exigences liées à la réglementation	143
Éléments nutritifs provenant des résidus de culture	145
Légumineuses dans un système cultural	146
Assimilation de l'azote provenant de résidus qui ne sont pas des légumineuses	149

Cultures de couverture pour la gestion de l'azote	149
Références	150

7. Recommandations de fertilisation

Facteurs limitant la réaction des cultures à la fertilisation	151
Élaboration de recommandations de fertilisation	153
Pondération des résultats d'analyse de sol	153
Gain de rendement à la suite d'apports d'engrais	154
Réponse au dosage	156
Élaboration des recommandations de fertilisation : « fertiliser la culture » ou « fertiliser le sol »	158
Doses économiques maximales	163
Résultat d'analyse du sol critique	163
Hypothèses et calculs	165
Comparaison	166
Autres points à considérer	169
Recommandations de fertilisation fondées sur l'analyse des tissus végétaux	178
Concentrations déficientes, critiques et suffisantes	179
Références	181

8. Ingrédients, mélanges et application des engrais

Engrais	183
Sources d'azote (N)	183
Sources de phosphore (P)	187
Sources de potassium (K)	189
Solutions claires	190
Solutions acides	190
Suspensions	191
Sources d'éléments nutritifs secondaires	191
Sources d'oligo-éléments	192
Produits destinés à améliorer l'efficacité des engrais	194
Produits destinés à l'agriculture biologique	196
Mélanges d'engrais	196

Inconvénients des mélanges	197
Compatibilité physique et chimique des constituants des mélanges	197
Importance de l'uniformité dans le calibre des granulés	198
Calculs des formules	199
Aspects juridiques	202
Épandage d'engrais	203
Innocuité pour les cultures	203
Méthodes d'application	205
Feuille de calcul relative aux applications d'engrais	212
Doses maximales sécuritaires d'éléments nutritifs	212
Source d'engrais et mise en place de l'engrais	212
Recommandations de fertilisation et calcul des doses	213
Références	215
Bibliographie	215

Annexes

Annexe A. Feuille de calcul des mélanges d'engrais : exemple pour mélanges N-K ou P-K	217
Annexe B. Feuille de calcul des mélanges d'engrais : exemple pour mélanges N-P-K	218
Annexe C. Feuille de calcul relative aux applications d'engrais	220
Annexe D. Conversions et équivalences	221

Glossaire 225

Index 231

Carences en éléments nutritifs dernières pages

Figures

1. La nature des sols et la fertilité du sol

Figure 1–1. Profil de sol généralisé1

Figure 1–2. Composant d'un sol idéal, par volume2

Figure 1–3. État de l'eau du sol dans un éventail de conditions d'humidité3

Figure 1–4. Caractéristiques de drainage et de rétention d'eau des principales classes de texture de sol.4

2. Éléments nutritifs

Figure 2–1. Échange de cations9

Figure 2–2. Mouvement des éléments nutritifs dans le sol11

Figure 2–3. Interception racinaire12

Figure 2–4. Zone des poils absorbants. .13

Figure 2–5. Répercussion des champignons mycorhiziens à arbuscules sur l'aire d'absorption du sol14

Figure 2–6. Écoulement de masse15

Figure 2–7. Prélèvement des éléments nutritifs par diffusion.16

Figure 2–8. Xylème et phloème17

Figure 2–9. Cycle de l'azote.20

Figure 2–10. Caractéristiques liées à l'eau de différentes textures de sol23

Figure 2–11. Prélèvement et répartition généralisés de l'azote chez le maïs relativement à l'accumulation d'unités thermiques de croissance et au stade de croissance de la culture.24

Figure 2–12. Voies fréquentes pour la perte de phosphore en Ontario27

Figure 2–13. Effets du pH du sol sur les formes de phosphore dans le sol28

Figure 2–14. Dépôts humides annuels de sulfates en Amérique du Nord en 1990, 2000, 2010 et 201539

3. pH du sol, chaulage et acidification

Figure 3–1. Échelle du pH présentant les concentrations relatives d'ion hydrogène (H^+) et d'hydroxyde (OH^-), ainsi que les valeurs de matières fréquentes53

Figure 3–2. Effet du pH du sol sur la biodisponibilité des éléments nutritifs dans les sols minéraux et organiques. . .55

Figure 3–3. Réactivité de la surface du sol dans le Sud de l'Ontario.56

Figure 3–4. Indice agricole66

Figure 3–5. Quantité de chaux à épandre67

Figure 3–6. Temps de réaction pour des chaux de différentes granulométries.68

4. Échantillonnage

Figure 4–1. Du champ au seau au labo . . .74

Figure 4–2. Effet de la manipulation des échantillons sur la teneur en azote minéral du sol75

Figure 4–3. Exemple de registre pour une grande culture76

Figure 4–4. Le profil du sol change sur une colline au fil du temps en raison de l'érosion induite par le travail du sol . . .77

Figure 4–5. Échantillonnage composite	78	Figure 7–3. Courbes de rendement du maïs obtenues à partir des résultats d'essais menés à trois emplacements en Ontario dans des sols ayant des teneurs en phosphore différentes	162
Figure 4–6. Échantillonnage géoréférencé	79	Figure 7–4. Détermination du niveau critique de l'analyse de sol	164
Figure 4–7. Zones de gestion de base en fonction de la topographie et du drainage	80	Figure 7–5. Pondération en fonction de l'accroissement et du maintien de la fertilité du sol	164
Figure 4–8. Localisation du point de prélèvement	83	Figure 7–6. Calcul du besoin pour l'accroissement et le maintien de la fertilité du sol	165
Figure 4–9. Localisation du point de prélèvement de tissu sur le maïs	83	Figure 7–7. Comparaison des profits associés aux approches à la fertilisation par rapport aux recommandations ontariennes actuelles	167
Figure 4–10. Échantillonnage des tissus pour diagnostiquer des problèmes	84	Figure 7–8. Rendement relatif à différentes concentrations	168
 		Figure 7–9. Effet prévu des changements de concentration de P sur la réponse de la culture à l'épandage d'engrais à base de P	169
5. Analyses de sols, de tissus végétaux et de fumier		Figure 7–10. Réaction de la tomate à la fertilisation azotée	173
Figure 5–1. Triangle des textures du sol	109	Figure 7–11. Rapport entre la teneur en éléments nutritifs des tissus végétaux et la croissance des plantes	179
 		8. Ingrédients, mélanges et application des engrais	
6. Sources organiques d'éléments nutritifs : fumier, biosolides, légumineuses		Figure 8–1. Test de ségrégation	198
Figure 6–1. Effet du type de fumier et de la méthode d'épandage sur le devenir de l'azote du fumier	134		
Figure 6–2. Minéralisation de l'azote provenant de résidus de cultures de couverture — moment et quantité relatifs	148		
Figure 6–3. Immobilisation de l'azote par différentes cultures de couverture après une récolte de concombres	150		
7. Recommandations de fertilisation			
Figure 7–1. Rendement du maïs en réponse à une fertilisation à base de phosphore	154		
Figure 7–2. Comparaison de deux différentes courbes de rendement	155		

Tableaux

2. Éléments nutritifs

Tableau 2–1. CEC type des minéraux argileux 8

Tableau 2–2. CEC typiques des textures de sol et de la matière organique 10

Tableau 2–3. Importance relative des manières dont les éléments nutritifs se déplacent du sol vers les racines du maïs 12

Tableau 2–4. Forme et mobilité des éléments nutritifs et des oligo-éléments dans le sol et les plantes 18

Tableau 2–5. Espèces du genre *Rhizobium* associées à différentes cultures de légumineuses 21

Tableau 2–6. Potentiel de perte d'azote des nitrates dans des sols saturés à différentes températures 22

Tableau 2–7. Concentration en potassium de certains échantillons de fourrage 33

Tableau 2–8. Réaction des cultures aux engrais à base d'oligo-éléments 42

3. pH du sol, chaulage et acidification

Tableau 3–1. Lignes directrices pour l'application de chaux sur les cultures en Ontario 61

Tableau 3–2. Chaux nécessaire pour corriger l'acidité du sol d'après le pH et le pH tampon du sol 62

Tableau 3–3. Valeurs neutralisantes de certains amendements calcaires 64

Tableau 3–4. Détermination de l'indice granulométrique du calcaire 64

Tableau 3–5. Soufre pour l'acidification du sol 70

Tableau 3–6. Efficacité relative des réducteurs de pH du sol 70

4. Échantillonnage

Tableau 4–1. Directives d'échantillonnage visant à tenir compte des éléments nutritifs appliqués en bandes 81

Tableau 4–2. Recommandations pour l'échantillonnage de tissus relatives au moment où procéder à l'échantillonnage et aux parties de végétaux à prélever 82

5. Analyses de sols, de tissus végétaux et de fumier

Tableau 5–1. Corrélation entre le P extractible et le P assimilé dans des conditions contrôlées de serre 94

Tableau 5–2. Méthodes d'analyse du sol agréées en Ontario 95

Tableau 5–3. Calcul des besoins en chaux 98

Tableau 5–4. Interprétation des lectures de conductivité électrique du sol 99

Tableau 5–5. Agents d'extraction du phosphore 100

6. Sources organiques d'éléments nutritifs : fumier, biosolides, légumineuses

Tableau 6-1. Proportion de l'azote total présent sous forme d'ammonium118

Tableau 6-2. Teneurs moyennes en éléments nutritifs des fumiers d'élevage liquides et solides120

Tableau 6-3. Quantités approximatives d'éléments nutritifs biodisponibles tirés des types de fumier liquide (comme épandus) — kg/m³.122

Tableau 6-4. Quantités approximatives d'éléments nutritifs biodisponibles tirés des types de fumier liquide (comme épandus) — lb/1 000 gal.123

Tableau 6-5. Quantités approximatives d'éléments nutritifs biodisponibles tirés des types de fumier solides (comme épandus) — kg/tonne124

Tableau 6-6. Quantités approximatives d'éléments nutritifs biodisponibles tirés des types de fumier solides (comme épandus) — lb/tonne impériale125

Tableau 6-7. Teneurs typiques en éléments nutritifs des fertilisants organiques municipaux (poids sec) . . .126

Tableau 6-8. Ratios C:N typiques de certaines matières communes129

Tableau 6-9. Calibrage de l'épandage de fumier solide sur une feuille de 1 m x 1 m (40 po x 40 po)138

Tableau 6-10. Densités du fumier . . .138

Tableau 6-11. Calibrage du dosage de fumier liquide à l'aide d'un seau à parois verticales139

Tableau 6-12. Rendements du maïs-grain avec et sans ensemencement sous couverture de trèfle des prés. . . .145

Tableau 6-13. Effets de la rotation des cultures sur la concentration d'azote des nitrates dans le sol après les semis et sur les rendements du maïs146

Tableau 6-14. Rajustement des besoins en azote (c.-à-d. le crédit d'azote) après des légumineuses147

7. Recommandations de fertilisation

Tableau 7-1. Facteurs limitant la réaction des cultures à la fertilisation .151

Tableau 7-2. Probabilité de réaction à la fertilisation à différents niveaux de fertilité du sol.157

Tableau 7-3. Comparaison des recommandations de fertilisation suivant les deux méthodes de pondération des résultats d'analyse. . .158

Tableau 7-4. Quel type de recommandation choisir159

Tableau 7-5. Comparaison de la recommandation pour la suffisance de fertilisation à la régression prévue de la dose économique maximale de phosphore161

Tableau 7-6. Comparaison des recommandations pour le phosphore découlant de différentes approches en fonction de la figure 7-3163

Tableau 7-7. Moyenne du coût de l'engrais et du rendement de la culture des recommandations pour le phosphore en fonction de différentes approches basées sur la figure 7-3 pour les 4 premières années du programme.166

Tableau 7-8. Influence de la variabilité des résultats d'analyse du sol en K sur la dose optimale de K en Ontario. . . .172

Tableau 7–9. Effet de la fertilisation insuffisante par rapport à la fertilisation excessive sur le rendement net sur l'investissement pour le maïs-grain . . .173

Tableau 7–10. Enlèvement des éléments nutritifs pour les grandes cultures en Ontario175

Tableau 7–11. Prélèvement des éléments nutritifs par les cultures horticoles et enlèvement des éléments nutritifs à leur récolte en Ontario177

Tableau 7–12. Causes pouvant expliquer la surabondance ou l'insuffisance d'éléments nutritifs dans les tissus végétaux180

8. Ingrédients, mélanges et application des engrais

Tableau 8–1. Ingrédients courants des engrais186

Tableau 8–2. Mélanges d'engrais liquides190

Tableau 8–3. Sources courantes d'éléments nutritifs secondaires et d'oligo-éléments191

Tableau 8–4. Comparaison de la conductivité électrique (CE) de solutions de démarrage de 1,5 % et de 2,5 % et de la teneur en éléments nutritifs du concentré d'engrais210

Tableau 8–5. Calendrier d'injection de l'azote et de la potasse211

Tableau 8–6. Doses maximales sécuritaires d'éléments nutritifs dans les engrais213

Préface

Des sols fertiles sont la base de la production agricole. Une gestion efficace des éléments nutritifs et de la fertilité du sol est essentielle pour des cultures durables et rentables en Ontario et dans le reste du monde.

Dans cette troisième édition du *Manuel sur la fertilité du sol* de l'Ontario, nous avons inclus les renseignements les plus à jour concernant les principes sur lesquels repose une gestion efficace des éléments nutritifs. Un nouveau chapitre d'introduction a été ajouté et l'ordre des chapitres a été modifié pour en faciliter la lecture. Des illustrations, des diagrammes et des figures ont été ajoutés et actualisés afin de communiquer clairement les principaux concepts de la fertilité du sol. Le gouvernement, l'industrie et la communauté de recherche ont collaboré pour s'assurer que le manuel reflète les besoins actuels des agriculteurs ontariens. Jetez-y un coup d'œil pour découvrir les renseignements les plus récents sur des sujets comme la réponse à l'azote du maïs-grain, les tendances dans le dépôt atmosphérique de soufre et les éléments fondamentaux du prélèvement des éléments nutritifs par les végétaux.

Au cours des dernières années, bon nombre de progrès ont été réalisés relativement à l'usage plus efficace des éléments nutritifs. Les doses d'azote, par exemple, sont demeurées stables, alors que les rendements du maïs en Amérique

du Nord n'ont cessé de croître. Des défis demeurent cependant. Les pertes de phosphore dans le lac Érié devront être abordées dans les prochaines années, tout comme le déclin de la matière organique dans les sols de l'Ontario. Le compactage est une autre préoccupation urgente qui a un impact direct sur la nutrition des cultures. Nous sommes d'avis qu'une bonne compréhension des sols, des éléments nutritifs et de leurs interactions est essentielle pour relever ces défis.

Que vous soyez un agriculteur, un conseiller, un chercheur ou un étudiant, nous espérons que vous trouverez les renseignements contenus dans le présent manuel à la fois pratiques et utiles.

Jake Munroe, rédacteur
Spécialiste de la fertilité des sols, grandes cultures, MAAARO

Mai 2018

Comité de corédacteurs

Christine Brown, Christoph Kessel, Anne Verhallen, MAAARO

John Lauzon et Ivan O'Halloran,
Université de Guelph

Tom Bruulsema,
International Plant Nutrition Institute

Dale Cowan,
AGRI Co-operative Ltd

1. La nature des sols et la fertilité du sol

Le *Manuel sur la fertilité du sol* de l'Ontario contient des renseignements sur les concepts fondamentaux de la fertilité du sol. Si vous vous êtes déjà demandé comment les éléments nutritifs se retrouvent dans les racines des végétaux ou pourquoi différents sols ont un pH qui varie, vous trouverez la réponse dans les pages qui suivent. Vous trouverez également des renseignements pratiques sur des sujets comme les techniques adéquates d'échantillonnage du sol, l'interprétation des analyses de sol et les méthodes d'épandage d'engrais.

La fertilité du sol est la capacité d'un sol à fournir les éléments nutritifs essentiels aux végétaux en quantités et en proportions adéquates pour leur croissance et leur reproduction. La nature et les propriétés physiques d'un sol — notamment la texture, la porosité et la composition minérale — déterminent sa fertilité inhérente. Dans ce chapitre d'introduction, nous explorerons ces propriétés fondamentales du sol et examinerons leur répercussion sur la productivité.

Horizons du sol

Chaque sol a un profil — une série de couches de la surface au matériau d'origine. Ces couches sont appelées « horizons » et sont désignées par les lettres A, B et C (consultez la figure 1–1).

L'horizon A, ou couche arable, est une couche organiquement enrichie qui contient la plus grande partie des racines des végétaux. C'est la zone où s'accumule la matière organique. Règle générale,

dans les sols minéraux de l'Ontario, la profondeur de la couche arable en friche ne dépasse pas 30 cm (12 pouces).

L'horizon B n'est pas visible, mais a un grand impact sur d'importantes propriétés du sol comme le drainage. Des matériaux comme les oxydes de fer et d'aluminium, ainsi que l'argile, s'accumulent au fil du temps dans l'horizon B. L'horizon B, ou sous-sol, contient moins de matière organique que la couche arable, mais contient généralement une plus grande proportion de petits pores et peut entreposer une plus grande partie de l'eau nécessaire à la croissance végétale.

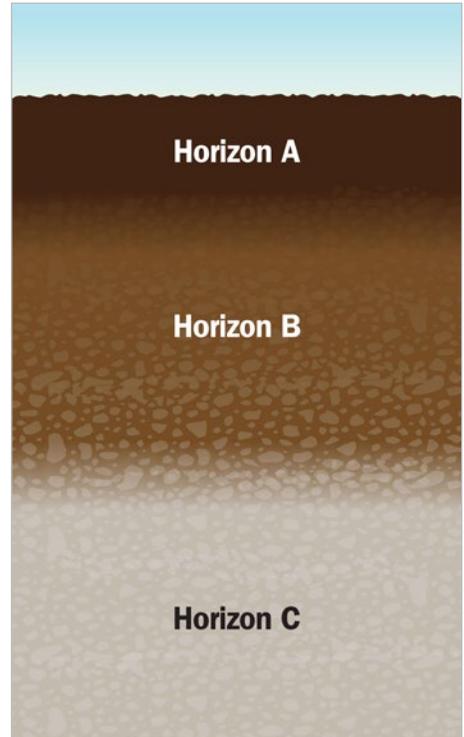


Figure 1–1. Profil de sol généralisé

L'horizon C est le matériau d'origine — le matériau à partir duquel le sol est formé. En Ontario, le matériau d'origine peut être notamment de l'argile à blocs, du sable ou un matériau très productif appelé loess. La plus grande partie du matériau d'origine dans le sud de l'Ontario est de l'argile à blocs, déposée par le retrait de glaciers il y a environ 10 000 ans de cela.

Composants du sol

Les sols sont constitués de quatre principaux composants. La couche arable idéale est souvent présentée comme contenant approximativement 25 % d'eau, 25 % d'air, 45 % de minéraux et 5 % de contenu organique par volume (consultez la figure 1–2). En réalité, ces proportions varient grandement en fonction du type de sol et de son historique de gestion, qui ont à leur tour de grandes répercussions sur la productivité du sol.

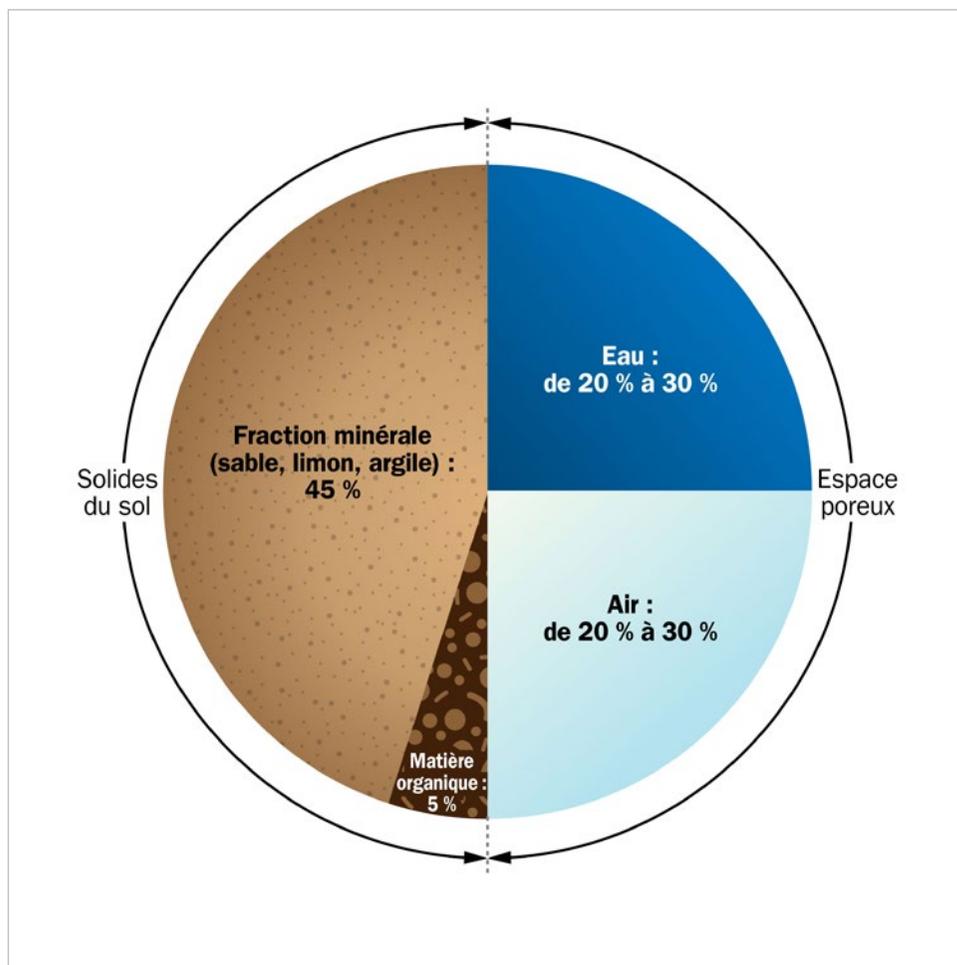


Figure 1–2. Composant d'un sol idéal, par volume

Les minéraux, l'eau, l'air et la matière organique qui composent le sol interagissent afin de créer le cycle et l'approvisionnement des éléments nutritifs pour les végétaux. Des réactions biologiques et biochimiques surviennent constamment dans le sol, ce qui aide à reconstituer les éléments nutritifs en réponse aux prélèvements par les végétaux. Tous les composants — minéraux, eau, air et matière organique — sont essentiels pour que ce processus se déroule. Dans la production agricole, l'objectif est de conserver un cycle efficace des éléments nutritifs et la capacité du sol à respecter les besoins en éléments nutritifs des végétaux (*The Nature and Properties of Soil*, 15^e édition, Brady et Weil).

Minéraux du sol

Tous les sols contiennent du sable, du limon et de l'argile. Les minéraux primaires comprennent ceux qui se trouvent dans le sable et le limon et sont susceptibles d'être confondus avec les matériaux à partir desquels ils sont formés. Les minéraux secondaires se forment par la météorisation des minéraux primaires. L'argile silicatée est un exemple, laquelle possède une grande aire superficielle et est chargée négativement.

La proportion de sable, de limon et d'argile dépend du matériau d'origine du sol et détermine la texture d'un sol. La texture du sol est une propriété inhérente qui ne peut pas être modifiée. Elle joue un rôle essentiel en déterminant le drainage et la disponibilité de l'eau, ainsi que la capacité d'un sol à retenir et à échanger les éléments nutritifs.

Eau du sol

Les éléments nutritifs doivent être prélevés par les végétaux dans l'eau du sol (ce qu'on appelle aussi la solution de sol), qui est constamment puisée et reconstituée. Un excès d'eau, cependant, limite le prélèvement d'éléments nutritifs par les racines. Par contre, une insuffisance d'eau limite le mouvement des éléments nutritifs vers les racines (consultez la figure 1–3). Cela sera discuté au chapitre 2 en termes de voies d'accès pour l'assimilation des éléments nutritifs.

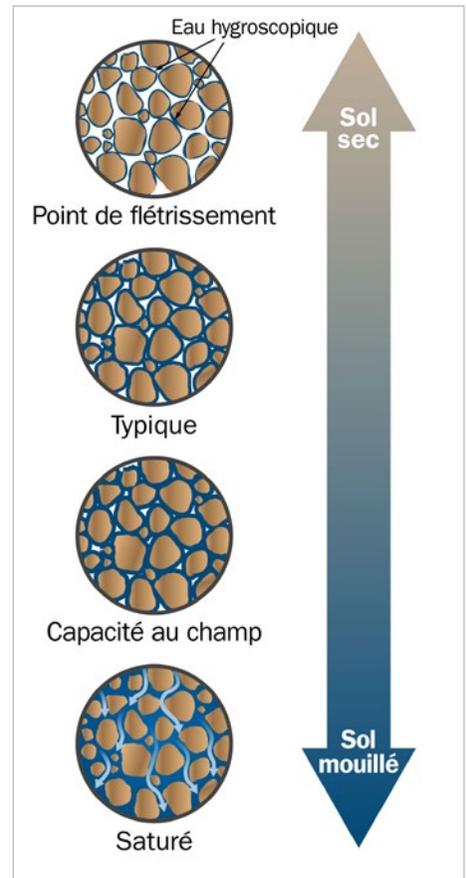


Figure 1–3. État de l'eau du sol dans un éventail de conditions d'humidité. Les flèches dirigées vers le bas indiquent l'eau de drainage.

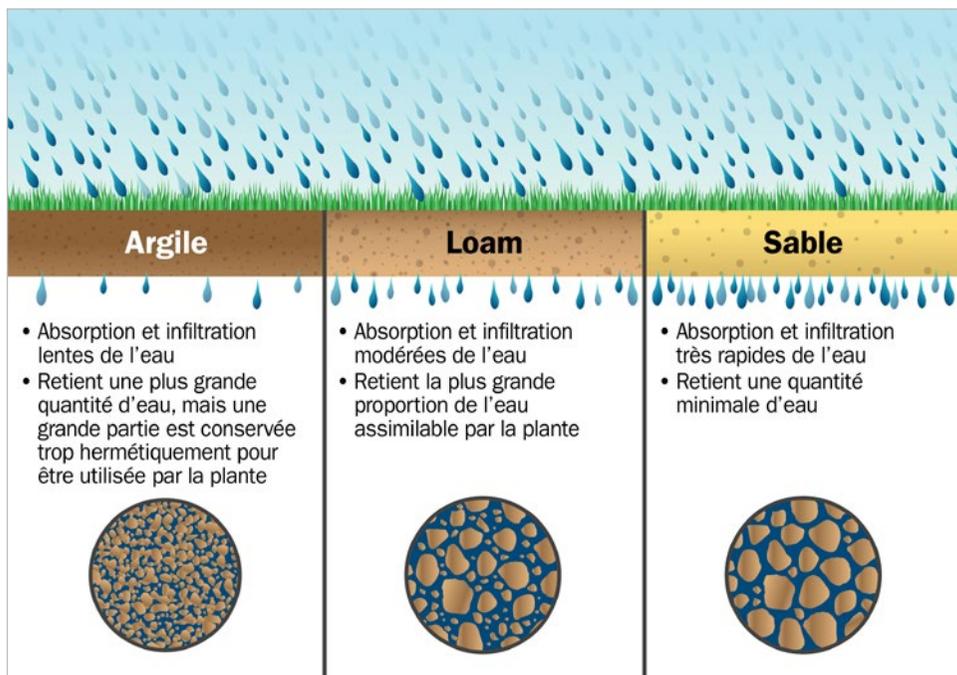


Figure 1–4. Caractéristiques de drainage et de rétention d'eau des principales classes de texture de sol

La capacité d'un sol à retenir l'eau peut être représentée comme celle d'une éponge. Une fois que le sol est saturé, l'eau dans le sol se drainera par les pores les plus gros. Elle est conservée dans de plus petits pores, où l'attraction avec le sol limite le mouvement. La texture d'un sol ainsi que le type et la proportion de ses pores détermine sa capacité à drainer et à retenir l'eau (consultez la figure 1–4) :

- Un sol avec un pourcentage élevé de gros pores, comme du sable, drainera rapidement une quantité relativement grande d'eau en raison de la gravité.
- Un sol argileux, qui contient plusieurs petits pores et quelques gros pores, drainera beaucoup moins d'eau et le fera plus lentement.
- Un sol idéal est un sol bien structuré avec une texture moyenne, qui draine l'eau adéquatement, mais qui fournit également une ample quantité d'eau disponible pour les végétaux.

Air du sol

Dans des conditions humides, mais non saturées, l'air occupe environ 50 % de l'espace poreux total dans un sol idéal. L'aération du sol est essentielle — pour l'échange gazeux, la croissance racinaire et la vie du sol. Lorsque l'eau se draine après une averse de pluie, les gros pores se remplissent d'air.

L'air dans le sol est différent de celui de l'atmosphère. Il est généralement assez humide et possède une teneur beaucoup plus élevée en dioxyde de carbone, ce qui découle de l'activité des organismes du sol et des racines des végétaux.

Un sol bien structuré avec une texture moyenne offre une proportion idéale de grandeurs de pores pour l'aération dans des conditions humides et sèches. Les sols à texture grossière ont tendance à présenter une proportion plus importante de pores remplis d'air. Cela permet

un excellent échange gazeux et une excellente croissance racinaire, mais peut entraîner un stress de sécheresse si la pluviosité est inadéquate. Le pourcentage élevé de petits pores dans les sols à texture fine peut entraîner des conditions de faible apport en oxygène durant les périodes de forte pluviosité, en plus d'accroître le risque de perte d'azote lors du processus de dénitrification.

Matière organique du sol

La matière organique du sol comprend tous les matériaux renfermant du carbone dans le sol. Elle est constituée de la vie microbienne, végétale et animale à différents stades tout au long du spectre de la matière vivante et intacte jusqu'à la matière morte depuis longtemps et décomposée. Même si elle est présente en quantité relativement petite, la matière organique a un effet important sur presque toutes les propriétés du sol. La matière organique stocke et fournit les éléments nutritifs, améliore la structure du sol et l'infiltration de l'eau, favorise l'activité biologique du sol et agit comme tampon contre les changements du pH du sol. Vous en apprendrez davantage sur la matière organique et son rôle dans la fertilité du sol en lisant le chapitre 2.

Interaction des composants du sol

La fertilité du sol englobe beaucoup plus que les valeurs des analyses du sol. La condition et la qualité physiques d'un sol, de la manière dont elles sont affectées par la gestion à long terme, ont un effet profond sur l'approvisionnement en éléments nutritifs pour les végétaux et la capacité de la culture à accéder à ces éléments nutritifs. C'est aussi le cas de l'activité biologique du sol. Les renseignements contenus dans le présent manuel sont essentiels pour une bonne gestion des éléments nutritifs dans les sols agricoles. Ils sont le plus efficaces lorsqu'ils sont appliqués parallèlement avec les pratiques de gestion optimales qui conservent ou améliorent la santé du sol à long terme.

« Des sols en santé fonctionnent plus efficacement avec un besoin moindre d'interventions humaines coûteuses et d'intrants que des sols en mauvaise santé et dégradés. » – page 48, *The Nature and Properties of Soils, 15^e édition*, Brady et Weil.

2. Éléments nutritifs

Puisque la culture enlève des éléments nutritifs des sols, les apports d'éléments nutritifs sous une forme ou une autre sont indispensables à une agriculture durable. Ces apports viennent remplacer les éléments nutritifs prélevés par les cultures, améliorer les rendements, hausser la nutrition et accroître la qualité et l'utilité des cultures.

Des marchés particuliers exigent la qualité, l'uniformité et la continuité de caractéristiques données. Le secteur des cultures n'a cessé d'évoluer et continue de s'améliorer, désireux d'offrir aux consommateurs des aliments variés, nutritifs et présentant des avantages pour la santé. Il est de toute première importance de comprendre le rôle que les éléments nutritifs jouent dans l'atteinte de ces objectifs.

Les éléments nutritifs se présentent sous différentes formes dans le sol, parviennent aux racines par différents moyens et jouent chacun des rôles précis dans la biologie végétale.

Formes des éléments nutritifs

Les éléments nutritifs sont retenus de différentes façons dans la matrice du sol.

- dissous dans la solution de sol;
- maintenus à la surface du sol;
- fixés à la matière organique ou contenus dans celle-ci;
- retenus comme composés insolubles;
- fixés dans les argiles.

Dissous dans la solution de sol

Bien des éléments nutritifs ne sont présents qu'en petite quantité à la fois dans la solution de sol (eau du sol). Seuls les éléments nutritifs dissous dans la solution de sol peuvent être absorbés par les racines des végétaux. La plus grande proportion d'un élément nutritif donné existe dans le sol sous d'autres formes plus ou moins biodisponibles pour les végétaux. À mesure que les éléments nutritifs sont prélevés de la solution de sol et assimilés par les végétaux, ils sont remplacés par des éléments nutritifs présents sous d'autres formes.

Maintenus à la surface du sol

Cations

La plupart des éléments nutritifs sont présents dans la solution de sol sous forme d'ions chargés soit négativement, soit positivement. Un ion chargé négativement est appelé un anion. Un élément nutritif avec une charge positive est appelé un cation.

Les cations existent dans la solution de sol et adsorbés sur la surface des particules de sol. Ils proviennent de la météorisation des minéraux du sol, de la dégradation de la matière organique et des apports de minéraux et d'engrais organiques. Le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), l'hydrogène (H^+) et le potassium (K^+) sont des exemples de cations.

Capacité d'échange cationique

Les colloïdes du sol (argiles et matière organique) ont une charge dominante négative. Puisque les charges opposées s'attirent, la plupart des ions retenus dans le sol de cette manière sont des cations positivement chargés. Le nombre de cations qui peuvent être retenus, et

par conséquent échangés, est égal à la quantité de charges négatives. Cette quantité est appelée la capacité d'échange cationique (CEC).

La capacité d'échange cationique est une mesure de la capacité du sol à retenir les éléments nutritifs chargés positivement. Elle s'exprime en centimoles de charge positive par kilogramme de sol (cmol/kg). Ces unités ont remplacé les milliéquivalents par 100 grammes, mais les valeurs numériques demeurent les mêmes, c.-à-d. 15 cmol/kilogramme = 15 milliéquivalents/100 grammes.

L'importance de la CEC dépend de la texture du sol, des types de minéraux présents et du pourcentage de matière organique. Plus la texture devient fine, plus la surface de contact augmente pour chaque gramme de sol. Cela crée plus d'endroits où les charges négatives peuvent avoir lieu et l'accroissement de la CEC.

Échanges cationiques

L'échange cationique est souvent présenté comme une donnée statique. Cependant, il s'agit d'un équilibre actif entre les ions dans la solution, sur la surface du sol et sous d'autres formes dans le sol.

Les cations sont attirés sur les surfaces de sol. L'attraction la plus forte et la plus grande concentration de cation existent près de la surface et diminuent à mesure qu'on s'en éloigne. Les cations font des allers-retours constants entre la solution du sol et la surface du sol (consultez la figure 2-1), mais la vitesse du mouvement de va-et-vient est égale. Le système est en équilibre.

Significations du mot *minéral*

Le mot minéral possède plusieurs définitions en ce qui concerne les sols et la fertilité du sol :

- Dans son sens géologique, *minéral* renvoie à un composé chimique d'origine naturelle avec une composition particulière unique, par exemple le quartz.
- *Ce terme* peut également renvoyer à la forme inorganique d'un élément nutritif. Par exemple, les engrais minéraux comprennent des produits comme l'urée ou le monophosphate d'ammonium.
- Dans son sens large, le terme *minéral* peut finalement renvoyer à la fraction sableuse, limoneuse et argileuse du sol.

Lorsqu'un changement survient dans le système, l'équilibre des déplacements changera. Par exemple, lorsque les cultures prélèvent des éléments nutritifs et les extraient ainsi de la solution de sol, il se produit un déplacement net hors de la surface des particules de sol jusqu'à ce que l'équilibre entre la solution et le sol soit rétabli.

Minéraux argileux

Les types de minéraux dans la fraction argileuse du sol sont différents de ceux qui se trouvent dans les fractions grossières. Au lieu d'être arrondis ou angulaires, les minéraux argileux forment des plaques planes à charges négatives concentrées sur les arêtes rompues des plaques. L'intensité de la charge négative varie selon le type de minéral argileux (consultez le tableau 2-1).

Tableau 2-1. CEC type des minéraux argileux

Minéral argileux	Capacité d'échange cationique (cmol/kg)
smectite	75-135
illite	15-40
kaolinite	3-15

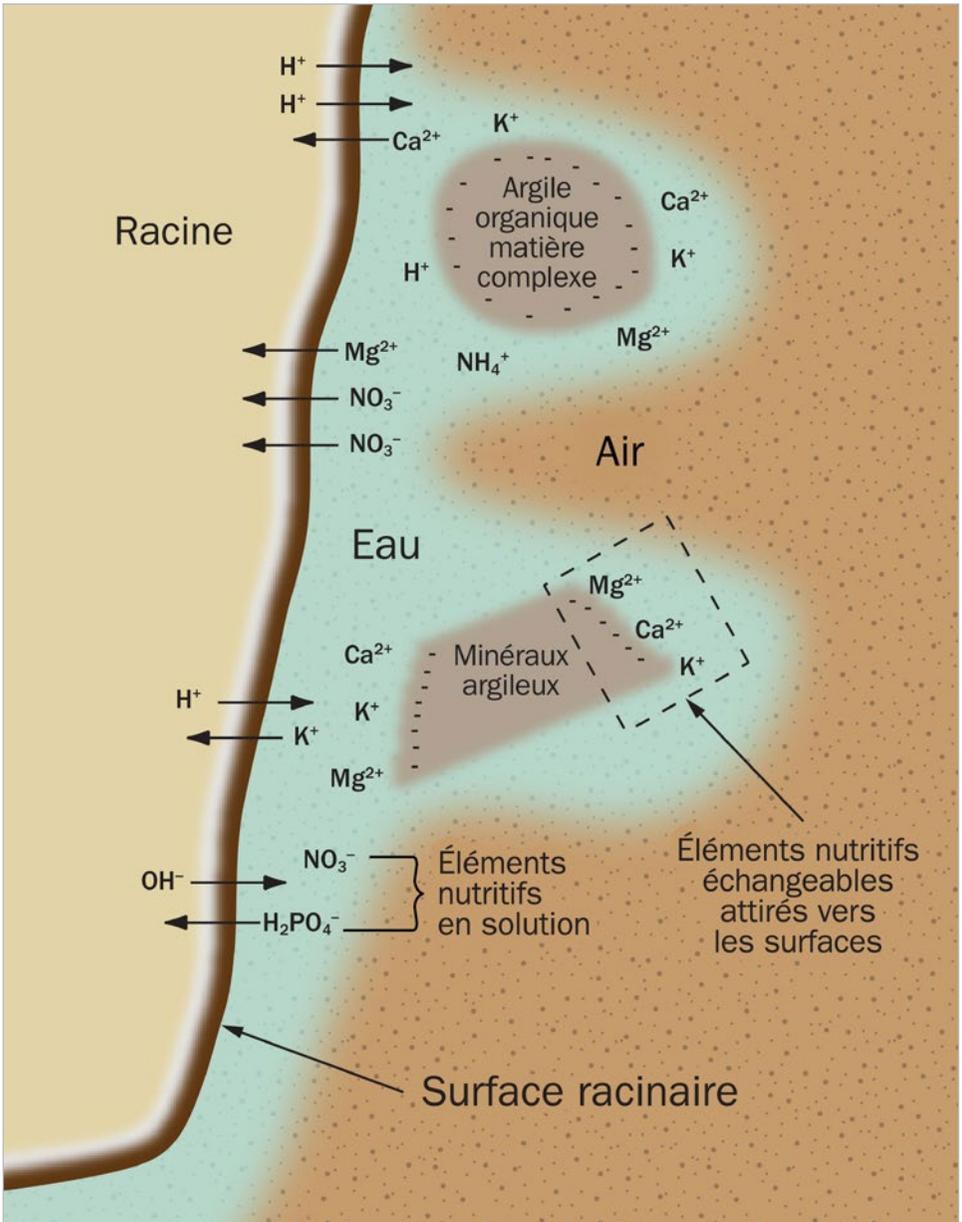


Figure 2-1. Échange de cations

Les minéraux argileux de l'Ontario et des régions environnantes sont constitués surtout d'illites et de smectites. Les argiles à kaolinite dominent dans les sols fortement météorisés du sud de l'Ontario, mais sont peu fréquentes en Ontario.

La charge de la matière organique est à prédominance négative. Dans les sols sableux avec une faible teneur en argile, la matière organique peut être responsable de la plus grande partie de la CEC totale du sol.

Absorber : intégrer ou rendre partie de soi-même.

Adsorber : faire en sorte qu'un gaz, un liquide ou une substance dissoute adhère en une mince couche à la surface d'un solide.

Fixés à la matière organique

La matière organique présente dans le sol se compose de résidus de culture, de microbes et de matériaux organiques parvenus à divers stades de décomposition. Les éléments nutritifs assimilables par les végétaux sont retenus à l'intérieur de cette matière organique et adsorbés sur ses surfaces. Le tableau 2-2 présente les valeurs typiques de la CEC de la matière organique et des classes de texture de sol.

Libération d'éléments nutritifs de la matière organique

Les éléments nutritifs provenant des résidus de culture et des fumiers sont libérés sous formes minérales dans la solution de sol une fois qu'ils sont décomposés par les organismes terricoles. Ces mêmes organismes peuvent absorber les éléments nutritifs provenant de la solution de sol s'ils en ont besoin pour leur propre croissance et développement. L'azote est d'ailleurs souvent prélevé par eux après un apport de matière organique riche en carbone. Dans un tel scénario, les microbes ont une source de carbone suffisante pour s'alimenter, mais ont besoin d'azote pour les protéines et les acides aminés dans leur corps. L'azote est par conséquent absorbé du sol et reste non assimilable dans les microbes jusqu'à ce qu'une partie des composants carbonés soit digérée. Consultez le chapitre 6, *Sources organiques d'éléments nutritifs*.

Tableau 2-2. CEC typiques des textures de sol et de la matière organique

Matière	CEC (cmol/kg)
sol sableux	2-10
Sol loameux	7-25
sol argileux	20-40
matière organique	200-400
terre noire > 20 % de matière organique	25-100

Parce que l'action microbienne atténue la libération d'éléments nutritifs provenant de matières organiques, elle est affectée par les conditions météorologiques. Si le temps est trop froid, trop pluvieux ou trop sec, la libération des éléments nutritifs peut être retardée, ce qui risque de nuire aux cultures. Il n'est pas inhabituel de voir des symptômes de carence en azote sur le maïs ou des céréales après des légumineuses ou du fumier si la température printanière est plus fraîche que la normale. La décomposition de la matière organique joue aussi un rôle important dans l'apport en oligo-éléments. Par exemple, une carence en manganèse peut survenir lors de printemps frais et sec, alors qu'une carence en bore est fréquente lorsque les conditions de sol sont sèches.

Effets du pH

La capacité d'échange cationique de la matière organique est supérieure à l'argile, à poids égal. Les acides organiques faibles à l'extérieur des particules de matière organique stables sont la source des charges négatives. Ces emplacements sont affectés par le pH. Dans les sols acides, les ions hydrogène sont si étroitement liés que ces sites ne peuvent participer aux échanges d'éléments nutritifs. En d'autres mots, la CEC de la matière organique est plus faible dans les sols acides que dans les sols alcalins.

Impact sur les propriétés sans rapport avec les éléments nutritifs

Même si elle est présente en quantité relativement petite dans la plupart des sols, la matière organique a un effet important sur presque toutes les propriétés du sol. En plus de son rôle dans le cycle des éléments nutritifs, la matière organique joue un rôle important dans la capacité de rétention d'eau du sol et dans le maintien de sa structure. La matière organique peut se trouver sous la forme de particules distinctes, mais existe plus communément dans une relation intime avec des particules d'argile et d'autres particules de sol. La décomposition de la matière organique par les microbes du sol constitue le ciment qui retient les agrégats du sol ensemble.

Retenus comme composés insolubles

Plusieurs éléments nutritifs réagissent fortement avec d'autres minéraux du sol, afin de former des composés insolubles ou légèrement solubles. Le meilleur exemple est le phosphore.

Le phosphate se lie avec du fer ou de l'aluminium dans les sols acides ou avec du calcium ou du magnésium dans les sols alcalins afin de former des composés insolubles. Le phosphate réagit également avec les oxydes de fer et d'aluminium dans le sol, formant des composés qui sont seulement légèrement solubles.

Fixés dans les argiles

Les illites ont entre leurs couches des espaces qui correspondent étroitement à la taille d'un ion potassium. Quand ces sols reçoivent des apports de potassium, les ions peuvent se trouver emprisonnés dans l'argile, une fois qu'ils se sont logés dans ces espaces et que les couches argileuses se sont effondrées sur eux, un peu comme les œufs à l'intérieur d'une boîte d'œufs. Comme le potassium,

l'ammonium a aussi tendance à rester emprisonné, ou « fixé ».

Les éléments nutritifs ainsi fixés sont peu à peu assimilables par les végétaux. Ils ne sont pas directement échangeables, mais se libèrent graduellement à mesure que les minéraux argileux sont météorisés ou dégradés par ressuyage, humectation, gel ou dégel extrême.

Transport des éléments nutritifs vers les racines

Pour que les éléments nutritifs soient absorbés dans un végétal, ils doivent être dans la solution de sol et à proximité de la surface des racines. Les éléments nutritifs dans la solution de sol se dirigent vers les racines par trois processus : l'interception racinaire, le débit massique et la diffusion (consultez la figure 2-2). La contribution relative de chacun de ces processus est présentée dans le tableau 2-3.

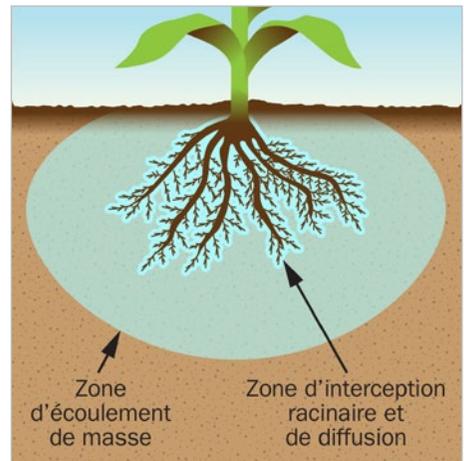


Figure 2-2. Mouvement des éléments nutritifs dans le sol

Tableau 2-3. Importance relative des manières dont les éléments nutritifs se déplacent du sol vers les racines du maïs

Élément nutritif	Quantité nécessaire pour 9,4 t/ha (150 boiss./ac) de maïs	Pourcentage fourni par		
		Interception racinaire	Débit massique	Diffusion
Azote	170	1	99	0
Phosphore	35	3	6	94
Potassium	175	2	20	78
Calcium	35	171	429	0
Magnésium	40	38	250	0
Soufre	20	5	95	0
Cuivre	0,1	10	400	0
Zinc	0,3	33	33	33
Bore	0,2	10	350	0
Fer	1,9	11	53	37
Manganèse	0,3	33	133	0
Molybdène	0,01	10	200	0

Cet exemple s'applique à un sol de loam limoneux fertile à pH neutre. Les proportions diffèrent en fonction des conditions du sol.

Source : Stanley A. Barber, 1984. *Soil Nutrient Bioavailability*. New York: John Wiley & Sons.

Interception racinaire

L'interception racinaire est le contact direct entre les racines et les éléments nutritifs dans la solution de sol (consultez la figure 2-3).

Les ions nutritifs sont prélevés par contact direct avec la racine ou toute mycorhize qui y est associée. Puisque cette forme d'absorption repose sur le contact direct, la quantité d'éléments nutritifs assimilables correspond à la quantité d'éléments nutritifs dans le volume de sol en contact avec les racines.

Les racines de la plupart des cultures occupent 1 % ou moins du volume de sol. Toutefois, à mesure qu'elles grossissent, elles choisissent la voie la plus facile à travers les pores du sol et les points faibles entre les mottes de sol. Certains pores, par exemple les trous de vers, sont enrichis d'éléments nutritifs. Les vers enduisent les parois de leurs tunnels de leurs excréments, qui ont une forte teneur en éléments nutritifs assimilables.

Par conséquent, les racines peuvent entrer en contact direct avec un maximum de 3 % des éléments nutritifs immobiles assimilables.

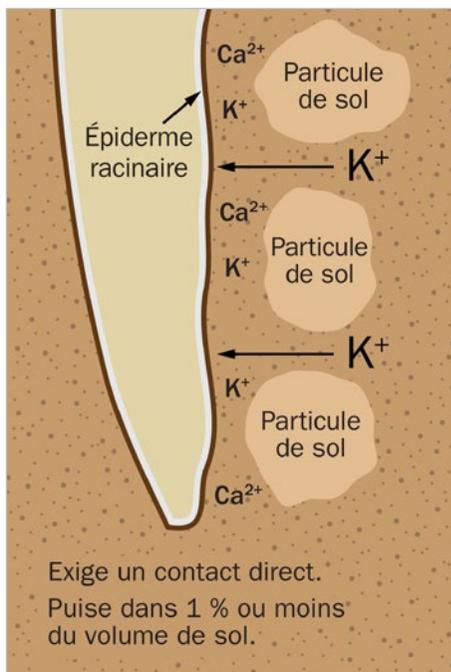


Figure 2-3. Interception racinaire

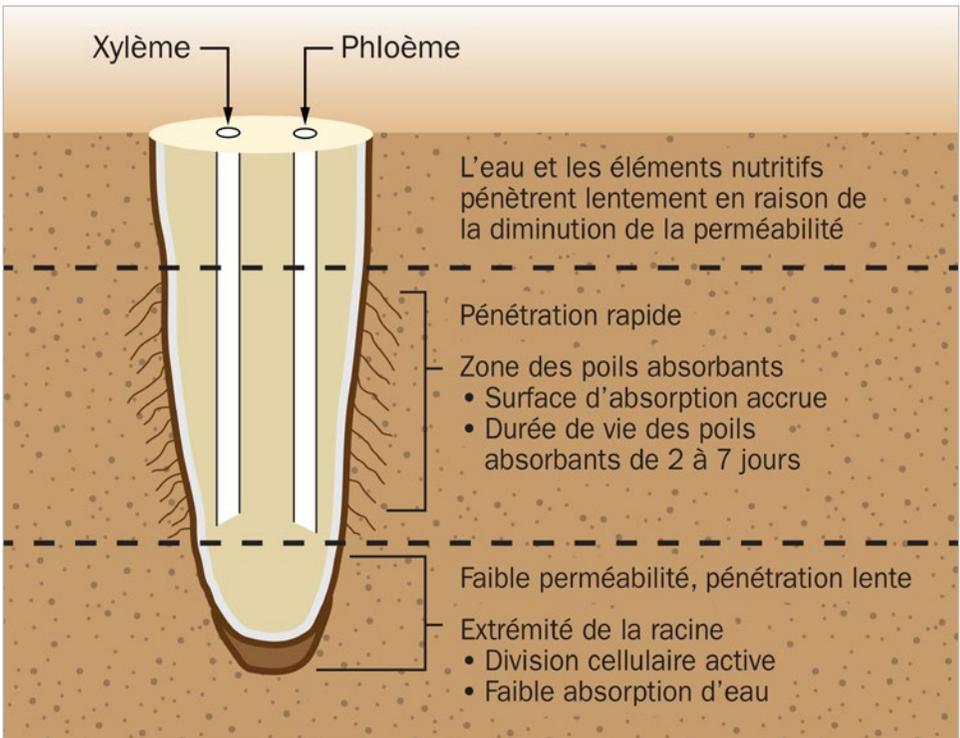


Figure 2-4. Zone des poils absorbants

La structure racinaire varie d'une espèce à l'autre. La longueur des racines influe directement sur le volume de sol avec lequel les racines sont en contact. Comme le montre la figure 2-4, les poils absorbants augmentent le volume de sol dans lequel les végétaux peuvent prélever les éléments nutritifs. Ainsi, l'oignon n'a virtuellement aucun poil absorbant, tandis que le canola possède des poils absorbants parmi les plus longs. Le canola peut donc avoir accès à un volume de sol de 20 à 30 fois supérieur à celui de l'oignon.

Les rapports symbiotiques, comme ceux avec les mycorhizes (consultez la boîte qui suit), peuvent augmenter le volume de sol à partir duquel les éléments nutritifs peuvent être prélevés et absorbés.

Les exsudats racinaires, comme le mucilage qui couvre les surfaces des racines, notamment l'apex, peuvent aider à accroître le prélèvement. Ce matériau gélatineux est sécrété par les cellules de l'extrémité de la racine et par l'épiderme. Il aide à lubrifier la racine lorsqu'elle pousse à travers le sol, empêche la racine de se dessécher et aide au prélèvement des éléments nutritifs. Le mucilage est particulièrement important dans les sols secs, car il améliore le contact sol-racine et joue un rôle dans le prélèvement du phosphore et des oligo-éléments. Les exsudats racinaires stimulent également l'activité microbienne dans la rhizosphère, ce qui peut accroître le cycle et la biodisponibilité des éléments nutritifs par rapport au sol en vrac avoisinant.

Champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA)

Le terme mycorhize vient du grec *mycos* (champignon) et *rhizae* (racine). Il existe plusieurs catégories différentes de mycorhizes. Les champignons mycorhiziens à arbuscules sont le type le plus important pour les cultures agricoles. Ils ont des filaments mycéliens (structures comparables aux racines) qui pénètrent les racines des végétaux et agissent comme un prolongement du système racinaire. Les champignons mycorhiziens à arbuscules existent naturellement en association avec environ 80 % de tous les végétaux terrestres.

Cette relation peut augmenter l'interception racinaire des éléments nutritifs en permettant à la plante de prélever ces derniers à même un plus gros volume de sol (consultez la figure 2–5). D'après certains calculs, l'augmentation pourrait être dix fois supérieure à celle des racines non mycorhizées.

Même si l'avantage de ce rapport symbiotique est le plus souvent associé à des sols qui ont une faible fertilité, particulièrement en phosphore, des preuves démontrent que les sols avec une fertilité élevée supportent le CMA. Les plantes avec une association mycorhizienne affichent un taux d'absorption du phosphore par unité de longueur racinaire de deux à trois fois supérieur par rapport aux plantes qui n'ont pas une telle association.

Des chercheurs de l'Université Nebraska-Lincoln (Grigera et coll., 2007 et Tian et coll., 2013) ont fait de nouvelles découvertes concernant les champignons mycorhiziens à arbuscules. Ils ont démontré que l'abondance de CMA dans les racines de maïs tend à augmenter tout au long de la saison de croissance; ce transport du phosphore

des CMA au maïs atteint son sommet juste avant la croissance reproductive, lorsque le taux de prélèvement de phosphore est le plus élevé; cette augmentation du taux d'engrais azoté n'affecte pas le taux de colonisation des CMA dans le maïs, mais réduit l'abondance de filaments mycéliens dans le sol.

À l'exception du canola et d'autres espèces du genre *Brassica*, la plupart des cultures agronomiques possèdent des champignons mycorhiziens à arbuscules. Les CMA ont tendance à se développer davantage dans les sols non remaniés, comme un sol non travaillé, ou potentiellement avec des cultures vivaces à plus long terme comme des arbres.

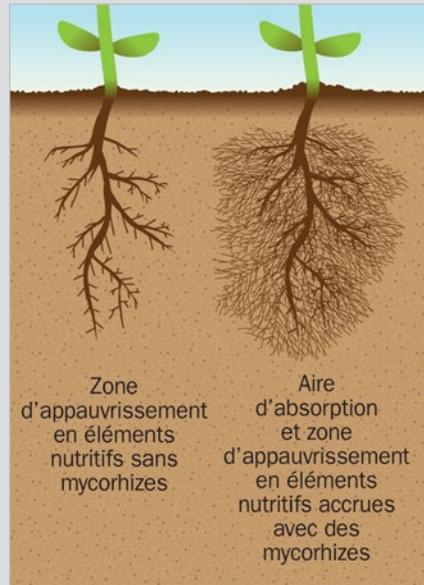


Figure 2–5. Répercussion des champignons mycorhiziens à arbuscules sur l'aire d'absorption du sol

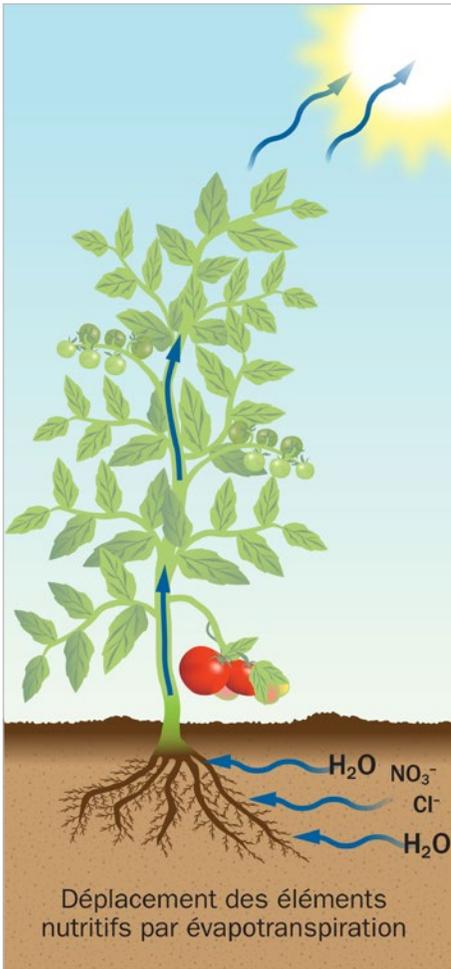


Figure 2-6. Écoulement de masse

Écoulement de masse

Lorsqu'un végétal prélève l'eau du sol, l'eau transporte les éléments nutritifs et d'autres matériaux en solution vers les racines (figure 2-6). C'est ce qu'on appelle l'écoulement de masse. Les pertes d'eau par évaporation et les déplacements d'eau par capillarité constituent aussi des écoulements de masse.

L'utilisation de l'eau par la plante et la concentration d'éléments nutritifs dans l'eau du sol déterminent la quantité d'éléments nutritifs qui atteignent la plante. Il s'agit du principal mode de transport des éléments nutritifs en

solution, tels que nitrates, sulfates, chlorures, bore, calcium et magnésium.

L'écoulement de masse favorise d'autant plus la fertilité des sols que les végétaux sont en croissance active, puisque le taux de transpiration est alors plus grand. La diminution du mouvement survient en présence de températures basses en raison d'une baisse du taux de transpiration, d'un ralentissement de la croissance et d'une réduction de l'évaporation à la surface du sol.

Diffusion

Ce terme s'entend du mouvement des ions des zones où ils sont plus concentrés vers celles où ils le sont moins.

Lorsque les racines prélèvent des éléments nutritifs dans la solution de sol environnante, la concentration des éléments nutritifs à la surface des racines diminue. Cela crée une concentration d'éléments nutritifs. Les éléments nutritifs dans des concentrations plus élevées dans la solution de sol se diffusent vers la zone où la concentration est plus faible, soit les racines (figure 2-7). Ce processus est influencé par les besoins des végétaux ainsi que par la texture et la teneur en eau et en éléments nutritifs du sol.

La diffusion est le principal mode de transport du phosphore et du potassium. Elle est lente dans la plupart des conditions de sol et ne survient que sur des distances extrêmement faibles. D'après les recherches, l'azote parcourrait 1 cm, pendant que le phosphore en parcourrait 0,2 cm et le potassium seulement 0,02 cm.

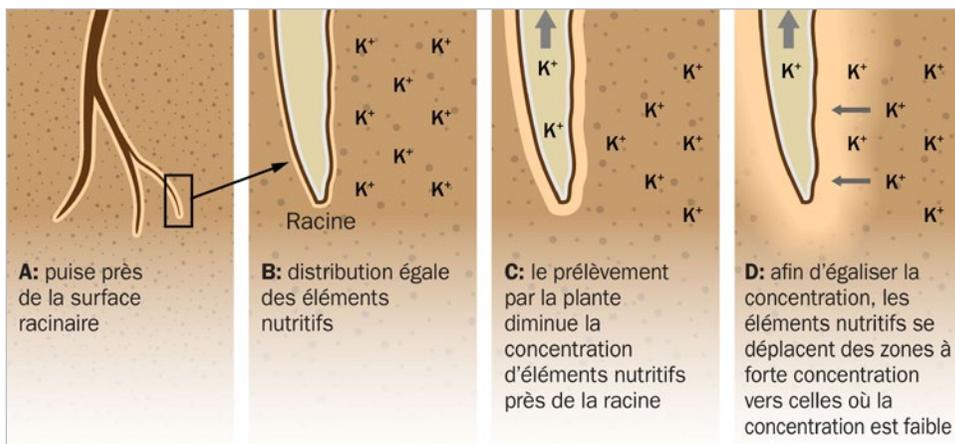


Figure 2-7. Prélèvement des éléments nutritifs par diffusion

Les prélèvements de phosphore et de potassium sont étroitement liés aux poils absorbants, chez nombre d'espèces végétales. Grâce au diamètre plus petit des poils absorbants, les taux de diffusion du phosphore sont plus élevés et plus efficaces que ce que parvient à réaliser la racine principale. Dans les sols pauvres en phosphore extractible, les poils absorbants peuvent être responsables de 90 % des prélèvements totaux.

La formation de poils absorbants est influencée par la concentration et la biodisponibilité d'éléments nutritifs comme le phosphore et les nitrates. Les sols avec de fortes concentrations de phosphore immédiatement assimilables présentent généralement des structures racinaires avec des poils absorbants courts et peu nombreux. La densité et la longueur des poils absorbants augmentent grandement dans les sols pauvres en phosphore.

Prélèvement des éléments nutritifs par les plantes

Règle générale, le prélèvement des éléments nutritifs renvoie au prélèvement et au transport des éléments nutritifs par le système racinaire. Même si les végétaux peuvent également absorber des éléments

nutritifs par les stomates et la cuticule des feuilles et dans une certaine mesure par les fruits qui se développent, les racines sont la principale voie de prélèvement.

Les plantes prélèvent les éléments nutritifs par des mécanismes actifs et passifs. Les ions des éléments nutritifs se déplacent passivement (un processus qui n'exige aucune dépense énergétique) jusqu'à une barrière à travers laquelle ils sont alors activement transportés (un processus qui demande de l'énergie à la plante) vers les organes de la plante qui métaboliseront les éléments nutritifs. Ce déplacement des ions survient grâce aux cellules végétales et du liquide interstitiel dans lequel baignent les cellules. Les cations, comme le potassium (K^+) et le magnésium (Mg^{2+}), sont prélevés le long des surfaces à charge négative des cellules racinaires. Les cellules racinaires libèrent des ions hydrogène positifs (H^+) pour maintenir la neutralité électrique (consultez la figure 2-1). Par conséquent, la solution de sol devient plus acide près de la racine de la plante. Avec le prélèvement d'anions, comme de l'azote (NO_3^-) et du sulfate (SO_4^{2-}), le pH de la solution de sol près des racines augmente (elle devient plus basique).

Voies d'accès de recharge pour l'assimilation

Pour la plupart, les ions des éléments nutritifs atteignent les cellules des feuilles par le xylème (consultez la figure 2–8). Toutefois, les éléments nutritifs peuvent pénétrer dans les feuilles par leurs stomates et leur cuticule et atteindre ainsi le liquide interstitiel à partir duquel ils deviennent assimilables. Les ions dans l'eau de pluie, dans l'eau d'irrigation ou ceux provenant d'épandages foliaires d'engrais peuvent suivre cette voie.

Mobilité des éléments nutritifs dans les végétaux

Les ions nutritifs passent des racines aux pousses et autres parties d'une plante grâce à la circulation de l'eau dans la plante. Les taux d'absorption de l'eau et de transpiration sont révélateurs de l'efficacité du déplacement des ions dans la plante.

Certains ions nutritifs sont assez mobiles dans la plante et se déplaceront par le phloème des zones de croissance établie vers les zones de nouvelle croissance (figure 2–8). D'autres sont moins mobiles, alors certains sont complètement immobiles dans la plante (tableau 2–4).

Connaître la mobilité des différents éléments nutritifs aidera à diagnostiquer les problèmes au champ. Les éléments nutritifs mobiles comme l'azote ou le potassium sont transloqués des feuilles âgées vers les feuilles plus jeunes qui se développent. Cela entraîne l'apparition de symptômes de carence d'abord sur les feuilles plus âgées. Par ailleurs, les carences en éléments nutritifs immobiles se développent sur les nouvelles feuilles. Le fait de noter où se manifestent les symptômes peut aider à cerner les éléments nutritifs en carence.

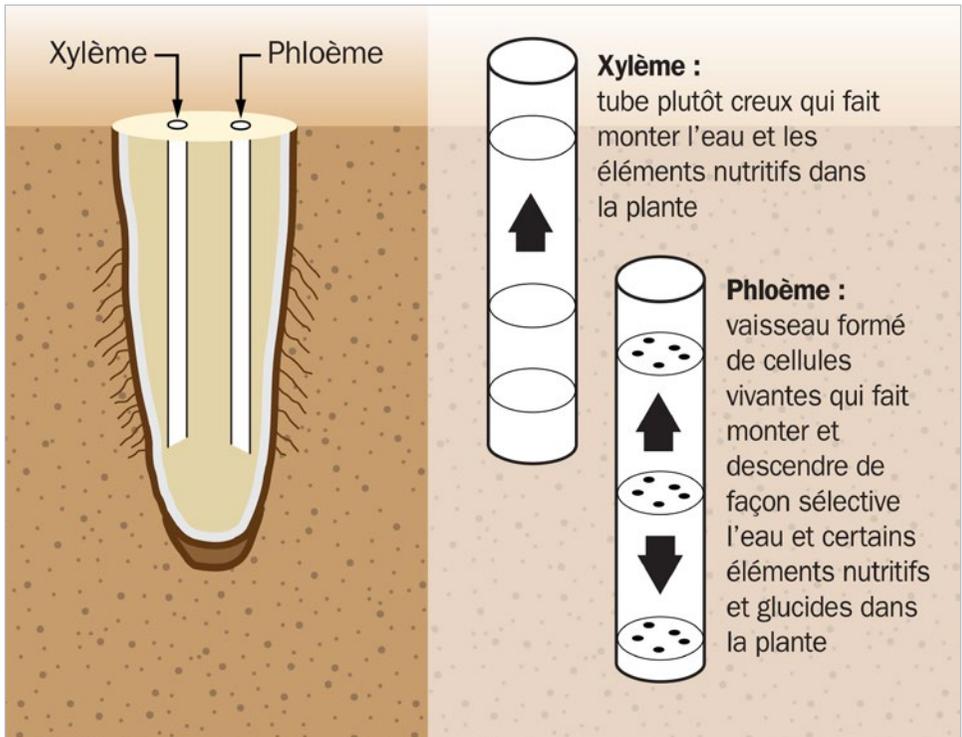


Figure 2–8. Xylème et phloème

Tableau 2-4. Forme et mobilité des éléments nutritifs et des oligo-éléments dans le sol et les plantes

Éléments nutritifs	Mobilité dans le sol	Formes biodisponibles dans le sol	Mobilité dans les plantes
Éléments nutritifs primaires			
azote	moyenne	ion ammonium (NH ₄ ⁺),	élevée
	élevée	ion nitrate (NO ₃ ⁻)	élevée
phosphore	faible	ion phosphate (H ₂ PO ₄ ⁻), HPO ₄ ²⁻	élevée
potassium	faible-moyenne	ion potassium (K ⁺)	élevée
Éléments nutritifs secondaires			
calcium	faible	ion calcium (Ca ²⁺)	faible
magnésium	faible	ion magnésium (Mg ²⁺)	élevée
soufre	moyenne	ion sulfate (SO ₄ ²⁻)	faible-moyenne
Oligo-éléments			
bore	élevée	acide borique (B(OH) ₃), ion borate (H ₂ BO ₃ ⁻)	faible-moyenne
chlore	élevée	ion chlorure (Cl ⁻)	élevée
cuivre	faible	ion cuprique (Cu ²⁺)	faible
fer	faible	ion ferreux (Fe ²⁺), ion ferrique (Fe ³⁺)	faible
manganèse	faible	ion manganèse (Mn ²⁺)	faible
molybdène	faible-moyenne	ion molybdate (MoO ₄ ²⁻)	moyenne-élevée
zinc	faible	ion zinc (Zn ²⁺), hydroxide de zinc (OH) ₂	faible

Rôle des éléments nutritifs chez les végétaux

Les tissus végétaux sont essentiellement constitués de carbone, d'hydrogène et d'oxygène, que les plantes extraient de l'eau et du dioxyde de carbone. Les autres éléments nutritifs indispensables sont en général combinés avec ces éléments pour jouer différents rôles liés tantôt à la structure, tantôt au transfert d'énergie, tantôt aux réactions enzymatiques. Par commodité, les éléments nutritifs sont divisés en éléments nutritifs primaires, éléments nutritifs secondaires et oligo-éléments, ce qui reflète les quantités relatives exigées pour la croissance et la reproduction de la plante.

Les végétaux ont besoin d'éléments nutritifs en quantités suffisantes pour afficher une croissance optimale. Toute carence en l'un ou l'autre des éléments nutritifs indispensables amènera une baisse de rendement ou de qualité. Les besoins particuliers des cultures en

éléments nutritifs dépendent aussi de facteurs environnementaux, comme une diminution de la croissance entraînée par une carence. Par exemple, une carence en potassium ou en chlorure peut accroître la susceptibilité d'une plante d'être malade et la réponse à ces éléments nutritifs peut donc être supérieure lorsque la maladie est présente. Le chapitre 7 traite plus en détail de la détermination des besoins des cultures en éléments nutritifs.

Éléments nutritifs primaires

On appelle éléments nutritifs primaires, ou macro-éléments, les éléments nutritifs dont les végétaux ont besoin en grandes quantités pour simplement croître et se développer. Les six éléments nutritifs qui entrent dans cette catégorie sont le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, le phosphore et le potassium.

Les végétaux extraient le carbone, l'hydrogène et l'oxygène de l'air et de l'eau. Les autres macro-éléments doivent être prélevés dans le sol. L'engrais, le fumier, la fixation de l'azote et la météorisation des minéraux réapprovisionnent le sol en éléments nutritifs. Les carences en éléments nutritifs primaires sont celles qui limitent le plus la croissance des végétaux.

N Azote

Tout l'azote (N) présent dans le sol provient initialement de l'azote dans l'atmosphère. L'air que nous respirons renferme, en volume, 78 % de N. Cet azote est cependant en grande partie inutilisable par la plupart des végétaux et doit subir une conversion chimique pour passer de sa forme gazeuse (N_2) à une forme biodisponible pour les végétaux (ammonium ou nitrate). La plus grande partie de l'azote est prélevé sous la forme de nitrate (NO_3^-) par les végétaux dans les sols agricoles, et seul un petit pourcentage est prélevé sous la forme d'ammonium (NO_4^+). Les différentes transformations que subit l'azote, ce qu'on appelle le cycle de l'azote, sont illustrées à la figure 2-9.

Dans le sol, la plus grande partie de l'azote est présente dans la matière organique. Les réserves du sol en N organique peuvent être élevées, se chiffrant à des milliers de kilogrammes par hectare (livres par acre). Consultez l'encadré.

Quelles sont les quantités d'azote présentes dans le sol?

Les sols contiennent une grande quantité d'azote, bien que la plus grande partie se trouve dans la matière organique et n'est que très lentement assimilable.

L'échantillonnage profond du sol dans le cadre de l'essai à long terme de rotation des cultures et de travail du sol au campus de Ridgetown de l'Université de Guelph a démontré la quantité totale d'azote qui peut se retrouver dans le sol. Des échantillons ont été prélevés à une profondeur d'un mètre en 2006, 11 ans après le début de l'essai, sur une argile Brookston. En moyenne, 9,4 t/ha (8 386 lb/acre) d'azote total ont été mesurées dans les premiers 20 cm de sol, dans toutes les rotations et tous les traitements aratoires. Dans le premier mètre de sol, il y avait 22,9 t/ha (20 431 lb/acre) d'azote total.

Source : Van Eerd et coll., 2014.

Fixation de N_2

La fixation de l'azote comprend tout processus qui convertit l'azote gazeux (N_2) de l'air en ammonium (NH_4^+) ou en nitrate (NO_3^-).

Les liens chimiques entre les atomes d'azote dans N_2 sont très solides. La fixation industrielle utilise une température et une pression élevées, en présence d'un catalyseur, pour combiner l'azote gazeux avec l'hydrogène provenant du méthane afin de produire de l'ammoniac. Il s'agit de la base pour la production de tous les autres engrais azotés.

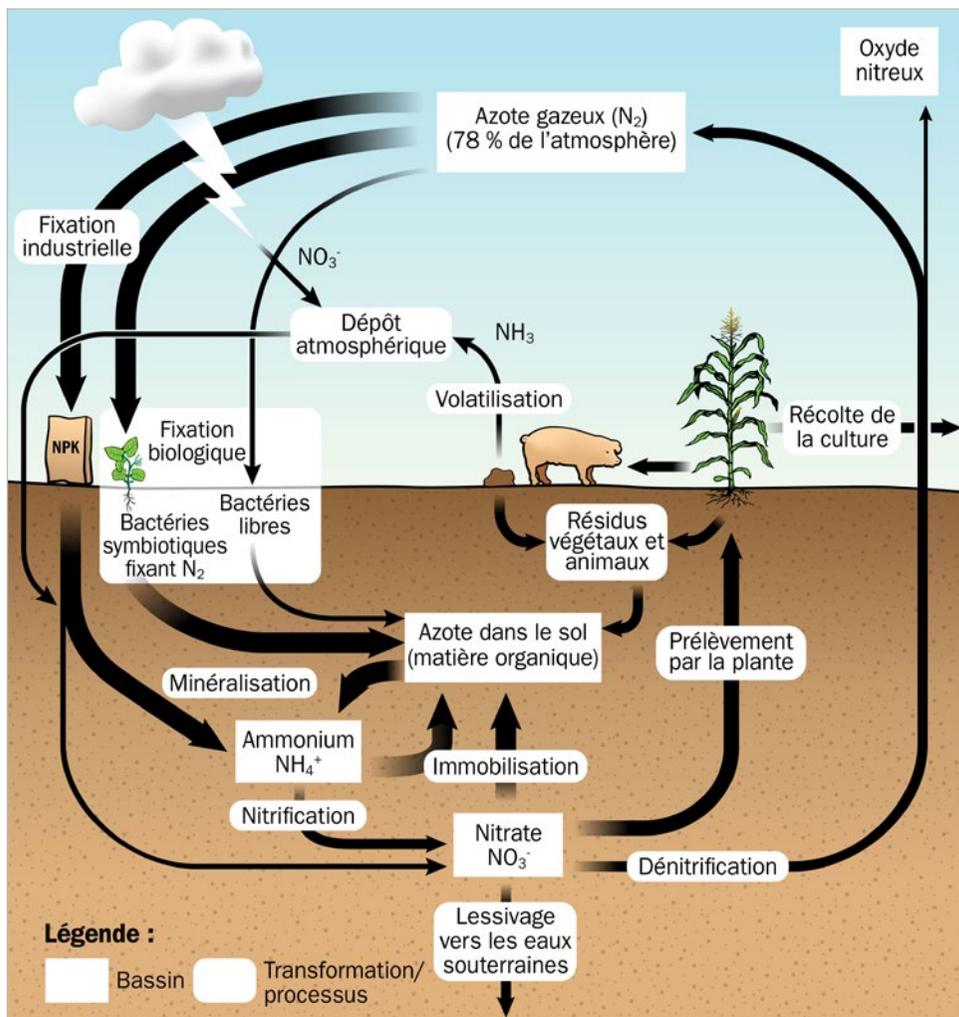


Figure 2-9. Cycle de l'azote

Fixation biologique symbiotique et non symbiotique de N_2

La fixation symbiotique de l'azote nécessite une plante hôte et des bactéries infectantes utiles. Parmi ces dernières, les plus courantes et les mieux connues sont les bactéries *Bradyrhizobium japonicum* de la famille des rhizobiacées, qui infectent les racines des plants de soya. Elles sont l'hôte d'autres rhizobiums utiles qui infectent les légumineuses, comme la luzerne et le trèfle (consultez le tableau 2-5). La plante hôte fournit les glucides aux bactéries colonisatrices

qui fixent l'azote atmosphérique dans les nodules qui les abritent et d'où l'azote ainsi fixé est transféré à la plante en vue de la synthèse des protéines. Cette activité est influencée par la concentration de N dans le sol, l'humidité du sol, le pH du sol, le stress imposé à la plante et le climat. La fixation symbiotique est ralentie par une teneur élevée du sol en N résiduel. Lorsque le plant de soya a besoin d'azote, il envoie un signal biologique partant des racines, lesquelles sécrètent une protéine promotrice pour attirer le rhizobium.

Tableau 2–5. Espèces du genre *Rhizobium* associées à différentes cultures de légumineuses

Espèces du genre <i>Rhizobium</i>	Cultures de légumineuses
<i>Sinorhizobium meliloti</i>	luzerne, méililot, fenugrec
<i>R. phaseoli</i>	haricots
<i>R. trifolii</i>	trèfle (sauf le trèfle Kura)
<i>R. lupine</i>	lupins
<i>R. leguminosarum</i>	pois, vesce, pois de senteur, lentilles
<i>Bradyrhizobium japonicum</i>	soya
<i>R. loti</i>	lotier corniculé

Des organismes non symbiotiques (bactéries libres), comme les *Azotobacters* et les *Azospirillum* fixent également l'azote provenant de l'air. Les taux moyens de fixation d'organismes non symbiotiques dans les sols agricoles varient de 5 à 20 kg de N/ha (4,5 à 18 lb/acre) par année.

Les éclairs représentent une autre forme de fixation, produisant suffisamment de chaleur et d'énergie électrique pour combiner l'azote gazeux et l'oxygène afin de former des nitrates. La quantité d'azote biodisponible produite de cette façon est modeste.

La quantité d'azote reçue sous forme de précipitations par année serait de l'ordre de 2 à 15 kg/ha (de 2 à 13 lb/acre). Au plus, la moitié de cette quantité est fixée par les éclairs.

Minéralisation

L'azote contenu dans les composés organiques ne peut pas être prélevé par les végétaux en quantités substantielles. La minéralisation est la dégradation microbienne de ces matières organiques, laquelle permet la libération de l'azote sous des formes non organiques. L'azote est libéré au départ sous forme d'ammonium, qui est

converti rapidement en nitrates par des microorganismes nitrifiants.

Immobilisation

L'immobilisation survient lorsque du NH_4^+ et du NO_3^- sont prélevés par des organismes terricoles. L'azote devient partie intégrante du corps et des processus des organismes terricoles. Si l'immobilisation survient en raison d'un ratio C:N défavorable, l'azote biodisponible est consommé par les bactéries du sol et n'est plus assimilable par les cultures. La minéralisation et l'immobilisation surviennent au même moment, et l'équilibre entre les deux est affecté principalement par le ratio carbone:azote des matières organiques dans le sol. Consulter le chapitre 6 pour de plus amples renseignements.

Nitrification

Il s'agit du processus par lequel les microorganismes terricoles convertissent le NH_4^+ en NO_3^- , la forme d'azote la plus facilement prélevée par les végétaux.

Dénitrification

La dénitrification est le processus par lequel le NO_3^- est converti en formes gazeuses d'azote, notamment l'oxyde nitreux (N_2O) et l'azote atmosphérique (N_2). Même si la plus grande partie des pertes d'azote causées par la dénitrification survient sous la forme de gaz N_2 , la perte d'oxyde nitreux a un impact important sur l'environnement puisque son potentiel de réchauffement de la planète est environ 300 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone. La dénitrification survient dans les sols avec peu d'oxygène et une mauvaise aération, comme des zones mal drainées ou où l'eau stagne temporairement. La perte d'azote dans les sols saturés peut être estimée à partir du tableau 2–6, qui illustre la perte potentielle associée à différentes conditions de température du sol.

Lessivage

Le lessivage est le mouvement descendant de l'azote des nitrates dans le profil de sol en raison de l'excès d'eau. La quantité de nitrates perdue et la profondeur du mouvement dépendront de la texture de la couche arable et du sous-sol, de la teneur initiale en humidité, de la quantité d'eau qui pénètre dans le sol et de la durée des précipitations. Le lessivage est plus prévalent au début du printemps et à l'automne, durant la période qui suit les récoltes. Très peu de lessivage survient durant les périodes de croissance rapide des cultures. L'azote des nitrates lessivé au-delà de la rhizosphère de la culture n'est pas biodisponible pour les racines et peut avoir un effet sur l'eau souterraine et les eaux de surfaces.

Une gestion attentive de l'irrigation est nécessaire pour éviter un mouvement excessif de l'azote des nitrates. Le nitrate ne se déplacera pas plus profondément par un simple événement de pluie ou d'irrigation que la profondeur de pénétration pour l'infiltration nette (la quantité de précipitations ou d'irrigation moins la quantité de ruissellement et d'évapotranspiration). La figure 2-10 montre la variation de profondeur où la pluie ou l'irrigation mouilleront le sol jusqu'à la capacité au champ dans différentes classes de texture. La capacité au champ est la quantité maximale d'eau qui peut être retenue dans le profil de sol après le drainage naturel.

Tableau 2-6. Potentiel de perte d'azote des nitrates dans des sols saturés à différentes températures

Température du sol (°C)	Taux potentiel de dénitrification (pourcentage de NO ₃ -N dans le sol)
< 12	1 %-2 % par jour
12-18	2 %-3 % par jour
> 18	4 %-5 % par jour

Source : Hoef, Robert, 2002.

Rôle de l'azote

L'azote est impliqué dans plusieurs processus et structures des végétaux. Comparativement à d'autres éléments nutritifs, il est nécessaire en grandes quantités.

L'azote est un constituant principal des acides aminés, qui forment les protéines à l'intérieur de la plante. Les protéines enzymatiques sont importantes dans un certain nombre de processus végétaux, particulièrement ceux qui ont un effet sur leur croissance et leur rendement. Les protéines sont généralement plus élevées dans la partie récoltée de la plante, raison pour laquelle il s'agit souvent d'un élément important dans la valeur nutritive de la culture.

L'azote joue un rôle important dans la production de chlorophylle, laquelle donne la couleur verte aux végétaux. La chlorophylle est responsable de la conversion de la lumière du soleil en énergie dont la plante a besoin grâce au processus de la photosynthèse.

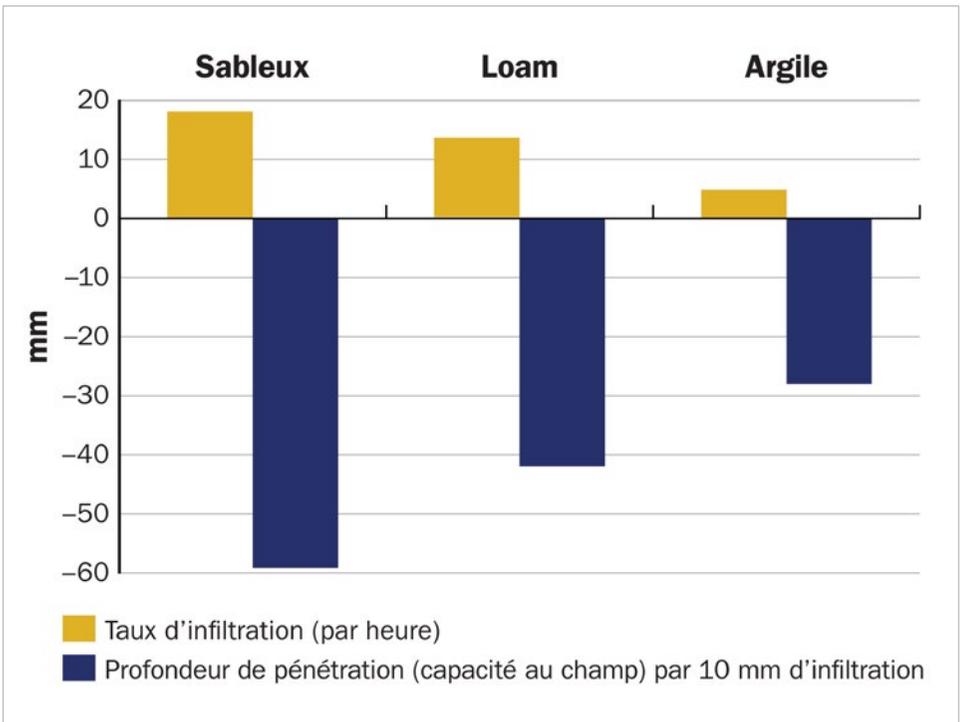


Figure 2–10. Caractéristiques liées à l'eau de différentes textures de sol

Carence en azote

La carence en azote est relativement fréquente dans l'agriculture ontarienne en raison de la mobilité de cet élément dans le sol et de sa susceptibilité à la dénitrification. Les causes les plus communes de carence en azote sont l'utilisation insuffisante d'engrais, le lessivage, la faible nodulation des légumineuses et la dénitrification causée par des sols gorgés d'eau. Les conditions qui retardent la minéralisation, comme des sols secs ou du temps froid, peuvent entraîner des symptômes temporaires de carence en azote. Le moment de la demande en azote varie selon la culture, mais la carence en N, si elle est présente, apparaîtra souvent lorsque le prélèvement s'accélère. Pour le maïs, cela survient autour du stade V6 (figure 2–11).

L'azote est un élément nutritif très mobile dans les végétaux. Lorsqu'une plante pousse et se développe, l'azote peut être déplacé ou réattribué vers les tissus qui croissent rapidement. Par conséquent, les symptômes apparaîtront d'abord sur les feuilles basses ou plus anciennes.

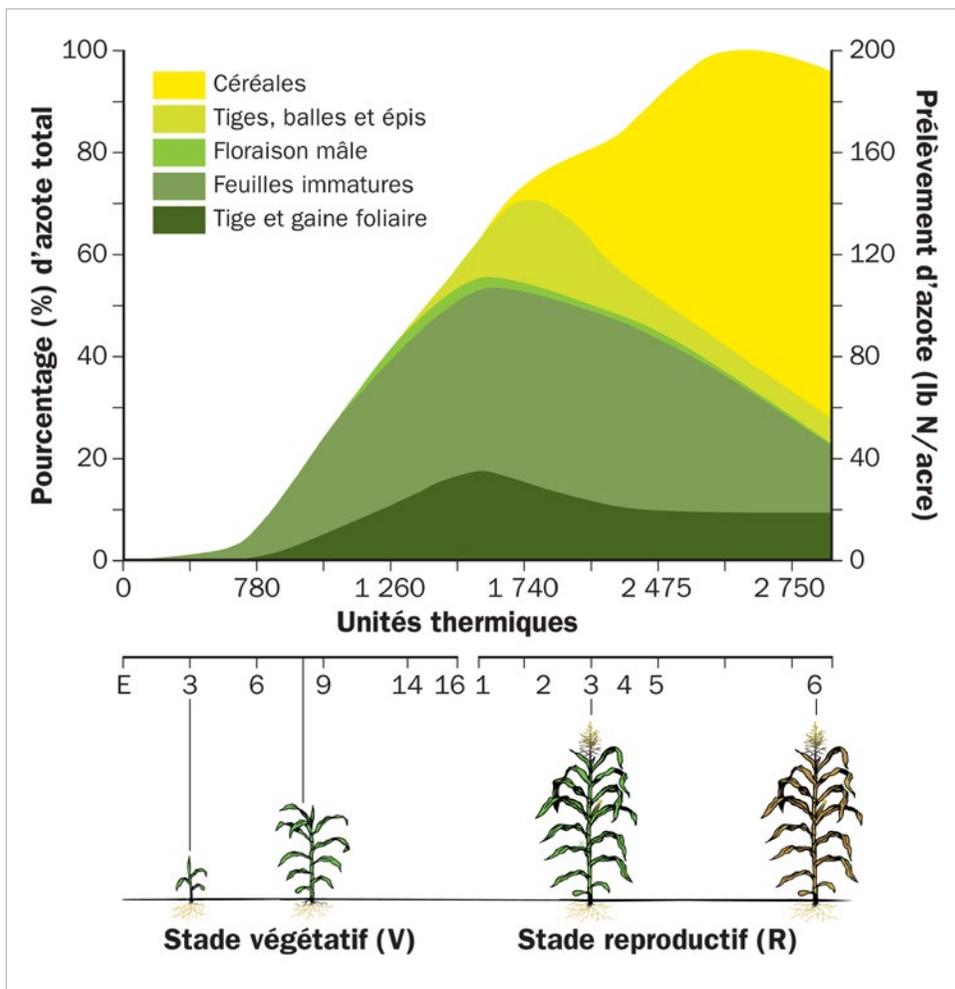


Figure 2-11. Prélèvement et répartition généralisés d'azote chez le maïs relativement à l'accumulation d'unités thermiques de croissance et au stade de croissance de la culture. Adapté avec la permission de l'Iowa State University Extension. (L'utilisation des mesures impériales reflète les normes utilisées dans l'industrie.)

Ratio carbone:azote

La teneur en carbone d'une matière organique relativement à sa teneur en azote détermine la minéralisation ou l'immobilisation. Les bactéries ont besoin d'azote pour décomposer les végétaux ou d'autres résidus. La décomposition de la matière organique riche en carbone ralentira jusqu'à ce qu'une quantité suffisante d'azote soit présente. Les bactéries du sol consommeront l'azote biodisponible pour le dégrader, ce qui crée un risque de carence en azote durant la saison, tant que subsiste un ratio C:N défavorable.

En principe, on assiste à la minéralisation lorsque le ratio C:N est inférieur à 25:1, et à l'immobilisation quand le ratio est supérieur à 25:1.

Symptômes

Maïs :

- couleur vert jaunâtre de la plante entière chez les jeunes plants, tiges fileuses;
- jaunissement en forme de V se formant le long de la nervure médiane des feuilles anciennes en commençant par l'extrémité (consultez la dernière page).

Légumineuses, y compris soya et luzerne :

- plantes vert pâle, fileuses et rabougries;
- feuilles qui jaunissent aux stades ultérieurs de croissance;
- carence observée dans la luzerne et le soya, dans des sols acides, où la nodulation est faible;
- du printemps, lorsque la plante commence à puiser l'azote, non plus dans les réserves de la graine, mais dans les nodosités.

Céréales :

- plantes vert pâle et finalement jaunissantes;
- plantes fileuses et rabougries.

Le blé d'automne qui subit une carence en azote peut être prédisposé au piétin ou aux infections par *Septoria*. En présence de ces maladies, des augmentations du rendement peuvent être obtenues par des applications de N plus élevées que la normale.

Tomates, pommes de terre, poivrons :

- chez les jeunes plants, les plantes entières sont vert pâle;
- chez les plants plus âgés, les vieilles feuilles jaunissent.

Fraises :

- plantes pâles, décolorées;
- croissance réduite.

Cucurbitacées :

- feuillage pâle, croissance de feuilles rabougries;
- tiges minces, dures et fibreuses.

Azote et maladies

Un déséquilibre nutritionnel, particulièrement un excès d'azote, peut conduire à une croissance luxuriante qui donne des tissus plus mous et moins résistants aux maladies. L'excès d'azote peut aussi entraîner des couverts végétaux denses qui emprisonnent l'humidité dans le couvert et créent des conditions propices au développement de plusieurs maladies fongiques.

P Phosphore

Formes de phosphore dans le sol

Le phosphore (P) se trouve sous trois formes dans le sol : le P soluble, le P labile et le P non labile. Moins de 5 % du phosphore total d'un sol est assimilable ou lentement assimilable par les végétaux en tout temps. Le reste est retenu dans la matière organique et dans un certain nombre de différentes formes minérales.

P soluble

Le phosphate monohydrogène (HPO_4)²⁻ et le phosphate dihydrogène (H_2PO_4)⁻ sont les formes de P soluble qui se trouvent dans la solution de sol et qui sont utilisées par les végétaux. Le P soluble est aussi préoccupant sur le plan environnemental puisqu'il risque d'être emporté par le ruissellement à la surface du sol ou par les tuyaux de drainage agricole.

P labile

Une autre portion du phosphore, le P labile, est conservée par les surfaces de particules d'argile et minéralisée dans la matière organique du sol. À mesure que le phosphore est prélevé par les végétaux et ainsi extrait de la solution de sol, d'autres ions phosphore sont libérés du sol dans la solution.

P non labile

Dans le sol, le phosphore réagit avec certains ions, tels qu'aluminium, fer et

calcium pour former des composés à très faible solubilité. Une certaine quantité du phosphore devient également adsorbée sur l'argile et est virtuellement non assimilable par les végétaux. Il s'agit du bassin non labile de phosphore dans le sol.

Pertes de phosphore

Puisque les concentrations de phosphore sont relativement faibles dans la solution de sol et que les composés découlant des réactions chimiques entre P et d'autres éléments ont une faible hydrosolubilité, très peu du phosphore assimilable est perdu par lessivage. Le phosphore peut cependant être emporté, grâce au ruissellement de surface ou aux tuyaux de drainage par des macropores, qui sont des voies comme de grosses anfractuosités et des amoncellements créés par des vers de terre (consultez la figure 2–12). Même si une petite quantité de phosphore soluble (dissous) est perdue en moyenne, cela peut avoir des répercussions importantes sur la qualité de l'eau. Le phosphore particulaire, ou lié avec le sol (P labile et non labile), peut être perdu par les mêmes voies. Réduire l'érosion, épandre du phosphore conformément aux résultats des analyses de sol au moment où le risque de ruissellement est faible et éviter les épandages non incorporés en pleine surface sont toutes des façons de minimiser le risque de perte de phosphore. Ce sujet est discuté plus en détail au chapitre 7, *Recommandations de fertilisation*.

Formes primaires et secondaires de phosphate

Les végétaux absorbent la plus grande partie de leur phosphore sous forme d'anion, soit comme orthophosphate primaire (H_2PO_4^-) ou comme orthophosphate secondaire (HPO_4^{2-}).

D'après les études, les plantes préfèrent la forme primaire dans un rapport de 10 à 1 environ. Par contre, comme il y a permutation rapide des deux formes dans le sol, cette préférence n'est pas importante.

Le pH du sol influence le ratio. À un pH de 7,2, les plantes prélèvent des quantités à peu près égales d'orthophosphate primaire et secondaire. Sous ce niveau, elles favorisent la forme primaire.

Qu'en est-il des polyphosphates?

Les polyphosphates sont aussi efficaces que les orthophosphates en tant que sources de phosphore pour les cultures. Même si les polyphosphates peuvent dans une certaine mesure être prélevés directement par les plantes, la plus grande partie des polyphosphates sera convertie en orthophosphates dans le sol et pourra alors être prélevée par les végétaux.

Renouvellement du phosphore dans la solution de sol

Si la solution de sol a une concentration en phosphore de 0,01 ppm et que le sol contient 30 % d'humidité par volume, les premiers 50 centimètres (20 pouces) d'épaisseur de ce sol contiennent alors 0,045 kg/ha de phosphore soluble.

Afin de respecter les exigences de prélèvement pour une culture de maïs de 10 000 kg/ha (160 bu/acre), la solution de sol devrait être reconstituée 667 fois durant la saison de croissance. Le P labile dans le sol reconstitue le P dans la solution de sol. Ce P labile provient des minéraux du sol, de précédents épandages d'engrais à base de P et de sources organiques de P.

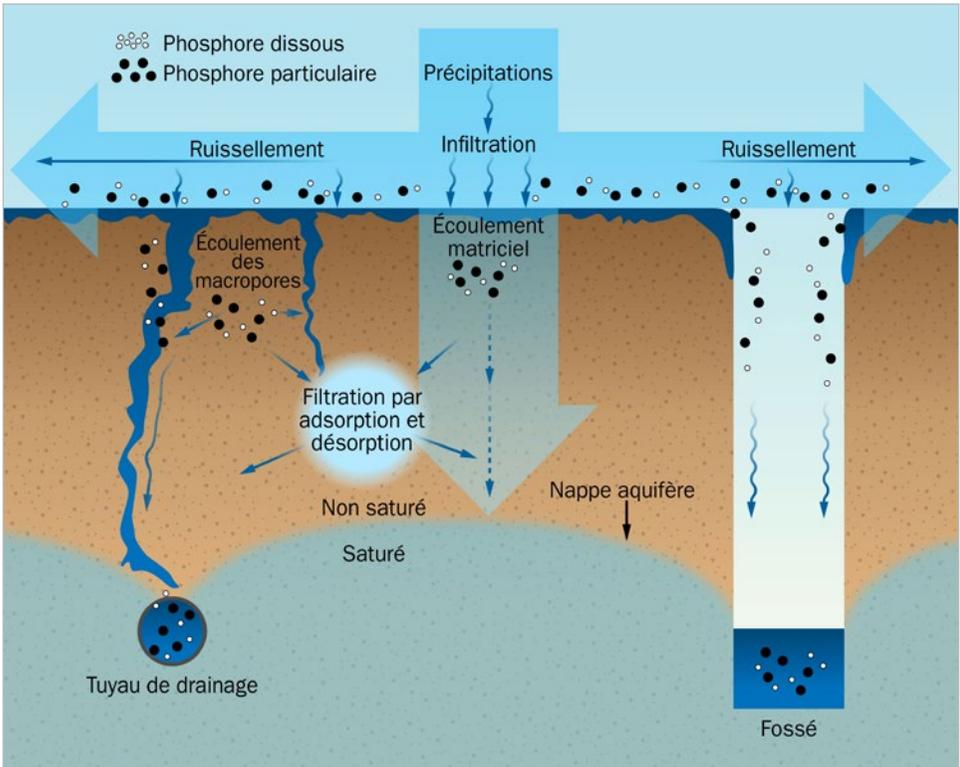


Figure 2–12. Voies fréquentes pour la perte de phosphore en Ontario. Deux formes de phosphore — dissous et particulaire — peuvent être perdues par deux voies principales : écoulement des macropores vers les tuyaux de drainage et ruissellement de surface. Adapté avec la permission du D^r David E Radcliffe, Université de Georgia, 2015.

Facteurs influençant la biodisponibilité du phosphore

pH

En présence d'un pH élevé (> 7,5), le phosphate réagit avec les composés de calcium et de magnésium, ce qui réduit sa solubilité dans l'eau et sa biodisponibilité pour les végétaux.

Dans les sols acides (pH < 6,0), le phosphate réagit avec le fer et l'aluminium et forme des composés insolubles, ce qui réduit sa biodisponibilité pour les végétaux.

La biodisponibilité maximale du phosphore survient à un pH entre 6,0 et 7,0, lorsque la fixation est minimisée. (Consultez la figure 2–13.)

Eau et température

Le phosphore se déplace dans le sol principalement par diffusion. À mesure que les teneurs en eau du sol diminuent, la pellicule d'eau entourant les particules de sol s'amincit, rendant la diffusion plus difficile.

La décomposition de la matière organique peut devenir une source de phosphore. L'eau et la température jouent un rôle dans la libération du phosphore de la matière organique par minéralisation. Si la température augmente, le taux de minéralisation s'accroît, ce qui libère davantage de phosphore.

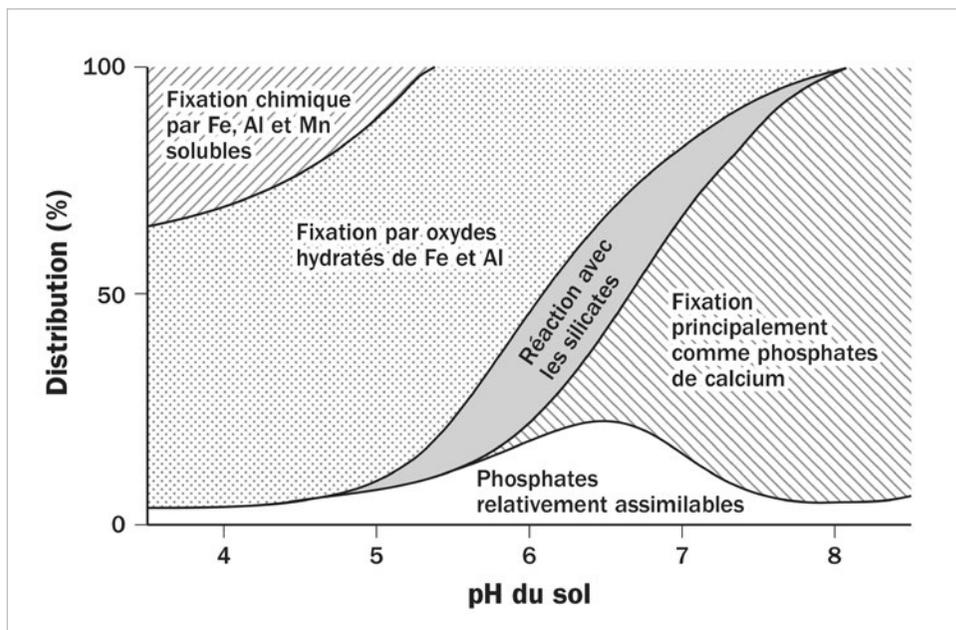


Figure 2-13. Effets du pH du sol sur les formes de phosphore dans le sol

Engrais

Au cours d'une année, les plantes utiliseront jusqu'à 30 % du phosphore épandu sous forme d'engrais ou de fumier. Cela dépend de la teneur de fond du sol en phosphore, de la mise en place des engrais et de la culture pratiquée. Plus le phosphore est épandu sous la forme d'engrais ou de fumier, plus il est assimilable par les végétaux. Le phosphore inutilisé par la culture dans l'année d'épandage reste rémanent.

Moment de la fertilisation et mise en place de l'engrais

Le mouvement du phosphore par diffusion représente à peine quelques millimètres par année. L'épandage en bandes au moment des semis est plus efficace que l'épandage en pleine surface, car il diminue la quantité de phosphore qui vient en contact avec le sol, ce qui réduit la fixation du phosphore. Épandre du phosphore près du moment des semis diminue également sa fixation en

minimisant le temps entre l'épandage et l'utilisation par la plante.

Le compactage du sol peut limiter grandement l'expansion des racines et l'aire superficielle du système racinaire se prêtant au prélèvement des éléments nutritifs. Les engrais de démarrage peuvent contribuer à atténuer les répercussions négatives que le compactage du sol peut avoir sur le prélèvement du phosphore.

Attention : La carence en phosphore dans les cultures vivaces (vergers, petits fruits, vignobles) est difficile à corriger. Analyser le sol avant d'établir des cultures vivaces afin de vous assurer qu'il y a suffisamment de phosphore pour la culture prévue.

Teneur en argile du sol

Plus le sol est argileux, plus le phosphore est adsorbé et moins il est présent en solution et assimilable par les végétaux. Cependant, les sols argileux possèdent une plus grande réserve de phosphore, ce qui permet de réapprovisionner la solution de sol à mesure que l'élément est prélevé par les plantes.

Résidus culturaux

Les sols soumis à des systèmes de travail du sol qui laissent à leur surface de grandes quantités de résidus peuvent réagir davantage aux apports de phosphore dans les engrais de démarrage, car les résidus conservent au sol plus de fraîcheur et d'humidité et les racines sont donc moins à même d'extraire le phosphore du sol. Les résidus de surface conservent davantage d'eau près de la surface du sol, de sorte que les racines peuvent continuer à prélever le phosphore de la couche arable plus tard dans la saison. Les résidus organiques sur la surface du sol peuvent retarder la fixation par le sol du phosphore épandu. Ainsi, les épandages de phosphore en pleine surface où sont pratiqués des semis directs peuvent être assimilables par la culture, même si cette méthode d'épandage peut ne pas convenir en présence d'un risque de ruissellement et de contamination de l'eau.

Lien entre le phosphore et les autres éléments nutritifs

Azote

Lorsque l'azote augmente dans la solution de sol, le prélèvement de phosphore augmente aussi. Cet effet pourrait être entraîné par une diminution du pH en présence d'une plus grande quantité d'ions ammonium dans la solution de sol. Par ailleurs, l'augmentation de l'azote accélère le taux de diffusion du phosphore de la racine de la plante à ses pousses.

Zinc

Les sols avec une combinaison de concentrations élevées d'engrais à base de phosphore et de concentrations faibles ou marginales de zinc peuvent présenter des symptômes de carence en zinc.

Rôle du phosphore dans les végétaux

Comme l'azote, le phosphore est un facteur important dans plusieurs réactions métaboliques et structures des plantes, notamment :

- photosynthèse et respiration;
- stockage et transfert d'énergie (ATP);
- métabolisme des protéines et des glucides;
- division et augmentation cellulaires;
- structure de l'ADN;
- composante des membranes cellulaires.

L'effet de la biodisponibilité et de la réserve de phosphore sur ces processus et ces structures des plantes se reflète dans des aspects précis de la croissance d'une culture.

Les racines tendent à proliférer dans les parties du sol les plus riches en phosphore. Globalement, toutefois, les concentrations plus élevées de phosphore dans le sol réduisent la masse totale des racines. S'il y a limitation phosphorique, les végétaux s'adaptent en réaffectant davantage de ressources vers la production de racines et moins vers la croissance de la partie aérienne. Cependant, si les réserves de phosphore sont suffisantes, l'augmentation de l'énergie et du métabolisme des glucides offre une meilleure survie hivernale à certaines cultures comme le blé et la luzerne. En quantité suffisante, le phosphore accélère la maturation de nombreuses cultures, notamment le maïs, les céréales et les tomates. On ne connaît pas parfaitement les raisons de ce phénomène; il pourrait être lié à l'amélioration des transferts énergétiques ou aux rythmes de division cellulaire.

Carence en phosphore

Les grandes cultures, comme celles du maïs et des céréales, prélèvent habituellement de grandes quantités de P au moment où elles n'ont atteint que 20 % de leur croissance. Cela peut être relié à la capacité d'une plante de prélever du P à des concentrations supérieures à ce dont elle a besoin pour combler ses besoins métaboliques au moment où le P est facilement assimilable et de le garder en réserve dans ses vacuoles cellulaires. Les plantes utilisent ce P en réserve pour combler leurs besoins de P au cours de stades de croissance ultérieurs.

Le phosphore ne se déplace jamais très loin dans le sol. Si les conditions de croissance sont mauvaises (sols froids, secs ou saturés), il peut y avoir une carence en phosphore causée par les conditions météorologiques. Ce type de carence a tendance à être attribuable à une croissance restreinte des racines et non à un sol pauvre en phosphore. L'apport nutritif en phosphore est un facteur régulateur dans le développement des semences durant la période de remplissage du grain, puisque la plupart des besoins des semences en phosphore sont comblés par la diffusion qui s'opère des feuilles vers les tiges. Des plantes ayant une teinte violacée peuvent souffrir d'une carence en phosphore, bien que ce symptôme ne soit pas fiable. La production d'anthocyanine, qui est à l'origine de cette coloration, est une réaction type à un facteur de stress. De nombreux autres facteurs peuvent provoquer cette coloration.

La carence en phosphore est plus difficile à déceler visuellement qu'une carence en azote ou en potassium.

Symptômes

Maïs :

- plants vert foncé;

- apparition, parfois, d'une teinte violacée, d'abord sur les feuilles anciennes ou basses (mais cela peut être un caractère normal chez un hybride);
- progression de la coloration violacée vers le haut du plant, si la carence s'aggrave;
- premières pousses souvent rabougries : tiges ultérieures parfois filiformes et raccourcies;
- maturité retardée.

Blé (consultez la dernière page) :

- plants vert sombre, à croissance lente;
- maturité retardée;
- rabougrissement et tallage réduit;
- faible survie hivernale.

Légumineuses, y compris soya et luzerne :

- croissance retardée, folioles fileuses et réduites, feuilles vert sombre;
- piètre survie hivernale des légumineuses vivaces comme la luzerne.

Tomates, poivrons, pommes de terre :

- croissance lente, retard de maturité, tissu internervaire violacé sur le revers des feuilles.

Choux :

- feuilles et tiges violacées;
- rabougrissement, croissance lente.

Pommes de terre :

- plants rabougris, feuilles vert foncé dont le pourtour s'enroule vers le haut;
- l'alternariose et le mildiou peuvent empirer en présence d'une carence en P.

Fraises :

- feuillage vert plus sombre ou bleu-vert.

Fruits d'arbre :

- diminution de la croissance des tiges, de la floraison et de la nouaison;
- rarement, feuilles de vert sombre à violacées.

K Potassium

Formes de potassium dans le sol

Les minéraux du sol sont riches en potassium, bien que peu de ce dernier soit assimilable par les plantes. Le potassium se présente dans le sol sous diverses formes.

Potassium non assimilable

Dans une proportion de 90 % à 98 %, le potassium du sol n'est pas assimilable par les plantes. On le trouve dans des minéraux comme le mica et le feldspath, qui résistent relativement à la météorisation. Cependant, au fil du temps et en présence d'une météorisation continue, ces minéraux libèrent lentement du potassium dans le sol.

Potassium lentement assimilable

Dans une proportion de 1 % à 10 %, le potassium total du sol est lentement assimilable par les végétaux. Il est piégé entre les couches de silice et d'alumine des argiles. Ces argiles se contractent et se gonflent au fil des sécheresses et des précipitations. Le potassium piégé entre les couches d'argile est lentement libéré lorsque l'argile se gonfle et devient assimilable durant les cycles de sécheresse ou de rétrécissement des sols.

Potassium assimilable

Dans une proportion de 1 % à 2 %, le potassium du sol est immédiatement assimilable et est retenu dans la solution de sol ou se présente sous une forme échangeable avec la matière organique ou les argiles du sol.

Dans la solution de sol, le potassium conserve un équilibre dynamique. Les ions potassium prélevés par les plantes sont rapidement remplacés par le potassium échangeable. L'apport d'engrais à base de potassium augmente énormément la teneur en potassium de la solution. L'adsorption du potassium sur

l'argile et la matière organique rétablit rapidement l'équilibre.

Facteurs qui affectent la biodisponibilité du potassium

Température du sol

Le potassium migre vers les racines des plantes principalement par diffusion. Lorsque la température du sol s'élève, le taux de diffusion, la croissance des racines et la conversion du potassium lentement assimilable en potassium assimilable augmentent. Ensemble, ces processus haussent les concentrations de potassium biodisponible.

Systèmes racinaires

Par diffusion, le potassium ne peut migrer que sur de faibles distances. Par conséquent, un système racinaire qui croît intensément et activement peut utiliser une plus grande quantité du potassium biodisponible dans le sol.

Aération du sol

Dans les sols mal aérés (p. ex., les sols compactés ou gorgés d'eau), la faible teneur en oxygène nuit au prélèvement du potassium. Cet effet est plus grave pour le potassium que pour l'azote ou le phosphore.

Teneur en eau

Des conditions de faible humidité du sol diminuent le déplacement du potassium vers les racines. De plus, le potassium du sol se fixe alors davantage entre les couches d'argile.

Teneurs en argile et en matière organique

Les sols pauvres en argile et en matière organique offrent moins de sites d'échange et, par conséquent, retiennent moins le potassium. De fortes pluies sur ces sols peuvent entraîner un lessivage des ions potassium. C'est pour cette raison que des échantillonnages plus fréquents sont parfois nécessaires dans les sols sableux.

Rapport entre le potassium et d'autres éléments nutritifs

Magnésium

De fortes concentrations de potassium peuvent nuire au prélèvement du magnésium par les végétaux. Dans certains cas, cela peut provoquer une carence en magnésium des végétaux. Des apports importants de potassium dans des sols pauvres en magnésium peuvent donc provoquer des carences en magnésium.

Dans le cas des fourrages, un sol pauvre en magnésium nuira à la nutrition des animaux avant de se répercuter sur la croissance des végétaux.

Rations des vaches tarées

Par une gestion plus intensive des cultures fourragères et une utilisation plus efficace des éléments nutritifs compris dans le fumier, les apports de potassium totaux dans certaines cultures fourragères ont augmenté. Si le sol renferme beaucoup de potassium, les plantes peuvent en prélever plus qu'elles n'en ont besoin pour un rendement maximal.

Des prélèvements excessifs de potassium par la luzerne et les graminées fourragères peuvent aboutir à de fortes concentrations de potassium dans les fourrages servis au bétail.

Chez les vaches tarées des races laitières, cela peut occasionner des problèmes de santé et de nutrition. En effet, dans les trois à quatre semaines qui précèdent le vêlage, un excès de potassium dans le régime peut augmenter l'incidence de la parésie post-partum (ou fièvre vitulaire) et de la rétention du placenta. Lorsque les vaches consomment des rations riches en cations, le pH de leur sang augmente, ce qui nuit au métabolisme du calcium. La quantité maximale de potassium souhaitable dans l'alimentation des vaches tarées varie. De façon générale,

la teneur en potassium des fourrages doit être inférieure à 2,5 % (base matière sèche). L'ajout de céréales ou de maïs d'ensilage dans les 3 à 4 semaines qui précèdent le vêlage peut aider à satisfaire aux demandes énergétiques en hausse et fournir un meilleur équilibre ionique alimentaire afin de réduire l'incidence de la parésie post-partum en ayant un effet plus favorable sur le pH sanguin.

Les vaches en lactation n'ont généralement pas autant de problèmes avec un excès de potassium. Le régime d'une vache en lactation est plus élevé en énergie, qui est fournie par des céréales et du maïs d'ensilage qui ont une teneur moins élevée en potassium.

Les concentrations de potassium dans les fourrages varient considérablement (tableau 2–7). L'analyse du fourrage peut appuyer la gestion de la fertilité des sols et améliorer l'alimentation du bétail. Consulter un spécialiste de l'alimentation du bétail avant de modifier les rations.

Tableau 2–7. Concentration en potassium de certains échantillons de fourrage

Type de fourrage	Moyenne (% de K)	Élevée (% de K)	Faible (% de K)
légumineuses d'ensilage mi-fané	2,5	4,0	1,0
mélanges destinés à l'ensilage mi-fané	2,5	4,6	0,7
ensilage mi-fané de graminées	2,4	4,6	1,0
foin de légumineuses	2,3	4,5	0,7
foin mixte	2,0	4,2	0,4
foin de graminées	1,9	4,8	0,9
ensilage de maïs	0,9	3,1	0,2

Données tirées d'échantillons soumis à des fins d'analyse auprès de SGS Agri-Food Laboratories, Guelph, 2010–2017.

Rôle du potassium dans les végétaux

Les plantes ont besoin d'à peu près autant de potassium que d'azote. Le potassium a cette particularité qu'il reste soluble dans la solution de cellules et ne devient pas partie intégrante des tissus végétaux. Il intervient dans de nombreux processus chez les végétaux. Le potassium :

- favorise la formation de composants structurels comme la lignine et la cellulose, qui jouent un rôle de premier plan dans la vigueur des tiges et la résistance à la verse;
- influence le prélèvement du dioxyde de carbone, la photosynthèse et la régulation de l'ouverture des stomates de la feuille;
- influence le prélèvement d'eau par les racines;
- influence la teneur en amidon et en glucose (et l'intégrité cellulaire), ce qui améliore les qualités d'entreposage de la pomme de terre, la qualité du jus du raisin, la « pelabilité » et les qualités de transformation des tomates entières;
- favorise la résistance aux maladies et aux insectes;
- réduit la quantité d'azote non protéinique soluble dans les fourrages.

Carence en potassium

Puisque le potassium est mobile dans la plante, les symptômes de carence apparaissent généralement d'abord sur les feuilles plus anciennes, souvent sous forme de nécrose (brunissement) ou de chlorose (jaunissement) du pourtour des feuilles.

Les causes les plus fréquentes de carence en potassium sont le manque d'engrais, les rotations qui comprennent plusieurs cultures de plantes entières (p. ex. la luzerne ou le maïs d'ensilage), la croissance racinaire restreinte en raison du compactage du sol, ou les premiers stades de conversion vers des systèmes de travail du sol réduit sur des sols plus lourds. Des conditions de sécheresse sur des sols sableux sont également une cause.

Symptômes

Maïs :

- jaunissement ou brunissement des pourtours des vieilles feuilles;
- rabougrissement;
- dessèchement des grains, avortement des grains à l'extrémité des épis;
- tiges faibles vulnérables à la verse et aux pourritures.

Luzerne :

- petites taches blanches ou jaunes près des bordures des feuilles (consultez la dernière page);
- déclin prématuré de la luzerne dans les peuplements mélangés;
- plus grande destruction hivernale;
- régénération plus lente.

Soya, haricots secs, haricots mange-tout :

- jaunissement ou brunissement des pourtours des vieilles feuilles (consultez la dernière page);
- risque d'enroulement vers le bas;
- réduction de la fixation de l'azote;
- maturité inégale.

Céréales :

- jaunissement général;
- feuilles pouvant jaunir ou bronzer sur leur pourtour;
- tallage excessif dans certains cas.

Tomates :

- jaunissement des bordures des feuilles;
- épaules jaunes sur les fruits mûrs (nuisant à la transformation des fruits entiers).

Raisin :

- bronzage du pourtour des feuilles;
- enroulement des feuilles.

Pommes de terre :

- brûlure des feuilles;
- baisse de rendement.

Cucurbitacées :

- feuilles chlorotiques;
- développement irrégulier du fruit (petit à l'extrémité pédonculaire et gros à l'extrémité apicale).

Éléments nutritifs secondaires

Le calcium, le magnésium et le soufre sont nécessaires en quantités modérées. Ces éléments sont habituellement classés parmi les éléments secondaires parce qu'ils sont moins susceptibles de limiter la croissance des cultures. Ces éléments nutritifs sont généralement présents dans le sol en quantité adéquate, même si un apport en engrais peut être nécessaire pour certaines cultures.

Ca Calcium

La plupart des sols de l'Ontario contiennent des quantités relativement importantes de calcium parce qu'ils ont été formés à partir d'un matériau d'origine calcique.

Le calcium dans la solution de sol est prélevé par les racines des plantes ou pénètre dans le complexe d'échange du sol et est retenu par les colloïdes argileux et la matière organique à charge négative.

Il existe, comme pour tous les cations, un équilibre entre la phase solution et le bassin d'échange. Si le calcium dans la phase solution est prélevé par la culture ou perdu par lessivage, les ions calcium (Ca^{2+}) seront libérés des sites d'échange pour restaurer la réserve et rétablir l'équilibre. À l'inverse, si le Ca^{2+} augmente dans la solution, davantage de calcium se fixera aux sites d'échange.

L'assimilabilité du calcium par les plantes est fonction de ce qui suit :

- la réserve totale de calcium;
- le pH du sol, les sols à pH faible étant plus sujets aux carences en calcium;
- la CEC, car la capacité du sol à retenir les cations détermine la quantité de calcium qui pourra être libérée et rendue assimilable par les plantes;

- le type de sol, puisque dans les sols sableux, le calcium est perdu par lessivage.

Rapport entre le calcium et d'autres éléments nutritifs

Les prélèvements de calcium sont réduits par l'azote ammoniacal et les excès de potassium, de magnésium, de manganèse et d'aluminium. L'azote des nitrates est la meilleure source d'azote là où la réserve de calcium est faible ou critique pour la qualité des cultures. Lorsque la plante prélève des nitrates, à charge négative, elle peut plus facilement assimiler les cations, à charge positive, notamment ceux de calcium.

Rôle du calcium chez les végétaux

Le calcium est prélevé par les plantes sous forme d'ions calcium (Ca^{2+}). Il atteint habituellement la surface des racines par l'écoulement de masse et l'interception racinaire. Le calcium est important pour la stabilisation de la paroi cellulaire et intervient dans le métabolisme et la formation du noyau cellulaire. Le pectate de calcium dans les parois cellulaires agit comme une barrière contre la pénétration des maladies. On a constaté que des concentrations adéquates de calcium augmentaient le rendement commercialisable en réduisant les troubles physiologiques.

Le calcium joue un rôle mineur comme catalyseur dans l'activation de quelques enzymes et la détoxification des acides métaboliques.

Le calcium migre par l'écoulement de masse causé par la demande d'eau subséquente à la transpiration des végétaux. L'essentiel du calcium se déplace vers les grosses feuilles qui demandent beaucoup d'eau, parfois même davantage que les fruits, qui n'ont qu'une perte due à la transpiration

relativement peu importante. Des troubles calciques peuvent alors se développer. Le calcium se déplace dans le système de transport du xylème et les symptômes de carence se manifestent à l'extrémité des pousses nouvelles ou terminales.

Troubles calciques

La pourriture apicale découle d'un manque de calcium dans la tomate (consultez la dernière page). Souvent, le sol renferme suffisamment de calcium, mais le flux de transpiration transporte le gros du calcium à travers la plante vers les feuilles plutôt que vers le fruit. Le stress hydrique, induit soit par la petitesse des racines, un système racinaire restreint, un excès de fertilisation azotée ou simplement un manque d'eau, rend la plante plus sujette aux déséquilibres calciques.

Selon les essais réalisés, il n'y aurait aucun avantage à faire des apports de calcium, par exemple de nitrate de calcium ou de calcium foliaire sur les tomates. Le problème en est un de gestion de l'eau.

La brûlure de la pointe de la laitue, le cœur noir du céleri et de la pomme de terre et la tache amère de la pomme sont d'autres manifestations de carences en calcium. Dans nombre de ces cas, il peut être avantageux de prévoir une application foliaire de calcium.

Carence en calcium

La carence en calcium est rare en Ontario. Les réserves en calcium sont généralement adéquates pour la plus grande partie des cultures lorsque le pH du sol se trouve dans la plage recommandée. Une analyse de sol révèle que dans les sols affichant des concentrations de calcium inférieures à 350 ppm, les pommes de terre commencent à réagir à des apports de calcium par la formation de tubercules plus gros, sans toutefois que ces apports améliorent le rendement total (Ozgen, Palta et Kleinhenz, 2006).

En présence d'une carence en calcium, les symptômes sont constatés dans les tissus qui croissent activement, puisque le calcium est immobile dans la plante une fois qu'il est fixé dans la structure cellulaire.

Gestion des cultures dans des sols pauvres en calcium

En Ontario, certains sols sableux, avec une faible CEC, mal tamponnés et qui ont un pH neutre sont pauvres en calcium. Ces sols souffrent habituellement du manque d'eau avant que les symptômes de carence en calcium ne se manifestent.

Ces sols conviennent aux cultures qui se prêtent à l'irrigation goutte-à-goutte. Ces modestes concentrations de calcium peuvent devenir problématiques quand les apports d'eau sont importants. Un épandage de gypse, de calcaire, de nitrate de calcium ou de chlorure de calcium doit alors être envisagé pour augmenter la teneur en calcium de tels sols.

Mg Magnésium

Les niveaux de magnésium varient considérablement sur le territoire ontarien, en raison de différences dans le matériau d'origine. Tout comme le calcium, le magnésium est fortement attiré vers les sites d'échange cationique, mais il percole un peu plus facilement que le calcium.

Le magnésium est présent dans le sol en solution et sous des formes échangeables, de même que sous des formes assimilables lentement, comme le calcaire dolomitique, les minéraux argileux et le feldspath. Il y a quelques régions où les concentrations de magnésium sont plus élevées que les concentrations de calcium. Ces sols se trouvent plus fréquemment dans les régions de l'est de l'Ontario et se caractérisent par une mauvaise structure et un mauvais drainage interne. Les épandages de calcaire calcitique ou de gypse peuvent améliorer la productivité de ces sols.

Le magnésium se déplace vers la racine par les trois modes de transport suivants : l'écoulement de masse, l'interception racinaire et la diffusion.

Rapport entre le magnésium et d'autres éléments nutritifs

La biodisponibilité du magnésium dépend de plusieurs autres éléments nutritifs. Le potassium, s'il est présent à de fortes concentrations et échangeable, peut interférer avec la biodisponibilité du magnésium. L'ammonium peut également interférer avec l'assimilabilité du magnésium par les plantes. Cela se produit le plus souvent lorsqu'on applique de fortes doses d'engrais à base d'ammonium sur des sols carencés en magnésium.

D'après certaines recherches, des concentrations adéquates de magnésium

favoriseraient l'assimilation du phosphore et sa mobilité dans les plantes. Les pertes de magnésium dans le sol sont dues aux prélèvements par les cultures, au lessivage et à l'érosion.

Rôle du magnésium dans les plantes

Le magnésium joue plusieurs rôles dans la croissance et le développement des plantes :

- structure des molécules de chlorophylle;
- synthèse des protéines;
- activation des enzymes.

Carence en magnésium

Les symptômes d'une carence en magnésium se manifestent souvent dans le bas du feuillage. Cela est dû au fait que le magnésium, comme l'azote, le potassium et le phosphore, est mobile dans les plantes et qu'il peut migrer vers les nouvelles pousses et y être réutilisé. Dans certains cas, une carence en magnésium peut se manifester par une coloration cramoisie des végétaux. Sur d'autres végétaux, cette carence se manifeste par la nécrose des tissus entre les nervures ou une coloration vert pâle du feuillage par suite d'un manque de chlorophylle.

Comme pour le calcium, les carences en magnésium sont souvent associées à un faible pH. Les sols acides à texture grossière sont plus susceptibles de présenter une carence en magnésium. Les sols à texture grossière qui renferment peu de magnésium et qui reçoivent des épandages répétés de fumier peuvent avoir tendance à présenter une carence en magnésium induite par la forte teneur en potassium du fumier, surtout s'il s'agit de fumier de ruminants.

Tétanie d'herbage

La téτανie d'herbage ou hypomagnésie est un déséquilibre du magnésium chez les ruminants qui découle de la consommation d'aliments pour animaux à faible teneur en magnésium. La faible teneur en magnésium des aliments pour animaux peut être due à la forte teneur en ammonium ou en potassium des engrais épandus sur la culture. Une teneur élevée en protéines dans la ration alimentaire réduira également l'assimilation du magnésium par l'animal.

Symptômes

Maïs :

- rayures d'abord de jaunes à blanches entre les nervures des vieilles feuilles, les zones rayées finissant par mourir;
- possibilité de confusion avec la carence en zinc, la différence étant que, dans le cas de la carence en magnésium, les rayures sont définies et vont de la base à la pointe de la feuille;
- coloration de rougeâtre à violacée se développant sur les vieilles feuilles.

Soya :

- coloration vert pâle entre les nervures des feuilles inférieures au début de la croissance;
- bordures des feuilles recourbées vers le bas, feuille entière jaune, sauf à la base;
- symptômes se déplaçant vers les feuilles du milieu, créant une apparence de maturité précoce.

Luzerne :

- coloration vert pâle des vieilles feuilles;
- rabougrissement et manque de vigueur du plant, apparition de taches de rouille formant des zones nécrotiques entre les nervures des feuilles, dépérissement possible du pourtour des feuilles;
- faible développement des nodosités.

Céréales :

- manque de vigueur et rabougrissement des plants, retards dans la reproduction;
- grandes taches irrégulières sur toute la zone située à l'extrémité des feuilles, progressant sur le pourtour des feuilles jusqu'à gagner la base des vieilles feuilles;
- rayures parfois présentes sur les feuilles qui vont alors du vert pâle au jaune, au rouge et au brun.

Pommes de terre :

- chlorose avec nervures vertes et taches brunes sur les jeunes feuilles matures (dessèchement des feuilles entre les nervures);
- malgré de nouvelles feuilles vertes, feuilles qui se dessèchent tout en restant attachées, dans les cas de carences graves.

Tomates :

- symptômes d'abord visibles sur les vieilles feuilles;
- veinures vert foncé, zones entre les veinures jaunes, une carence en azote intensifiant les symptômes.

Céleri, carotte :

- nécrose des bordures des feuilles et chlorose internervale des vieilles feuilles;
- enroulement des feuilles.

Raisin :

- nécrose internervale et du pourtour des feuilles;
- jaunissement ou rougissement internervale;
- développement de tâches brun-vert.

S Soufre

Le soufre est un élément indispensable à la croissance des végétaux. La détermination de l'état sulfaté peut nécessiter l'analyse du sol, l'analyse du tissu végétal, l'observation et la connaissance des besoins particuliers de la culture. Il n'existe pas actuellement en Ontario d'analyse de sol reconnue pour le dosage du soufre. Même si des laboratoires ontariens offrent des analyses du sol pour le dosage en soufre, il n'est pas possible de traduire ces résultats en recommandation pour le soufre puisque des données d'étalonnage particulières à l'Ontario manquent. Un risque inhérent existe à utiliser des recommandations pour d'autres zones de culture. L'évaluation du tissu végétal ainsi que des bandes d'essais dans les champs sont utiles pour déterminer l'état sulfaté d'un système cultural donné. Les cultures dont on sait qu'elles exigent du soufre, comme le canola, méritent une attention toute spéciale.

Les récentes réductions des émissions atmosphériques de soufre (consultez la figure 2–14) et l'utilisation de produits fertilisants plus raffinés au cours des dernières décennies ont conduit à une baisse des dépôts de soufre dans le bassin des Grands Lacs. Dans le passé, on présumait que les concentrations de soufre dans le sol suffisaient à la production culturale en Ontario. Au cours des dernières années, des réactions économiques aux engrais soufrés ont été observées dans certains cas pour la luzerne. Des symptômes visuels de carence ont aussi été signalés plus fréquemment pour le blé d'automne, et l'épandage de S est devenu plus fréquent dans plusieurs régions.

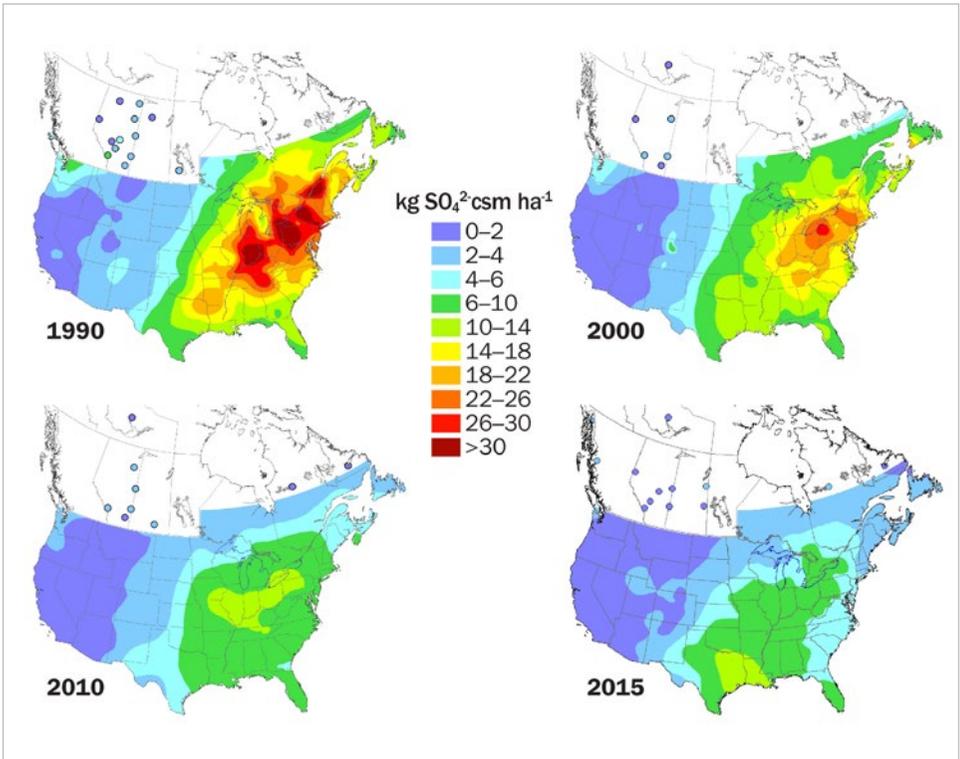


Figure 2-14. Dépôts humides annuels de sulfates en Amérique du Nord en 1990, 2000, 2010 et 2015. **Remarque :** $\text{SO}_4^{2-}\text{-csm}$ = dépôts de sulfates corrigés en fonction du sel de mer. *Source :* Environnement et Changement climatique Canada, 2018. © Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par la ministre de l'Environnement et du Changement climatique, janvier 2018.

Pluies acides et soufre

Jusqu'en 1990, certaines régions du sud de l'Ontario recevaient jusqu'à 44 kg/ha (39 lb/acre) de sulfates annuellement des pluies et des neiges acides. Cependant, ces dépôts n'apportent actuellement que 8 à 12 kg/ha (de 7 à 11 lb/acre) de $\text{SO}_4\text{-S}$ par année dans les sols du sud de l'Ontario. Le nord-ouest ontarien reçoit encore moins de soufre.

La possibilité de carence en soufre est souvent plus importante dans les sols sableux avec une faible teneur en matière organique. Le soufre sous forme de sulfate étant fortement soluble, il peut être emporté par lessivage. Les pertes de soufre peuvent aussi se produire en même temps que les pertes de matière organique et par érosion de la couche arable. Étant donné la réduction des dépôts de sulfate atmosphérique au cours des dernières décennies, des symptômes de carence dans certaines grandes cultures (p. ex. blé d'automne et luzerne) se manifestent plus souvent dans un éventail de types de sol.

Le soufre est présent dans le sol sous de nombreuses formes, à la fois organiques et non organiques. L'ion sulfate (SO_4^{2-}) est la forme de soufre assimilable par les végétaux. La plus grande partie du soufre dans le sol est contenue dans la matière organique. La transformation du soufre entre les formes organiques et non organiques non assimilables et le sulfate assimilable par les végétaux concerne quatre principaux processus :

- la minéralisation;
- l'immobilisation;
- l'oxydation;
- la réduction.

La minéralisation est la décomposition de la matière organique dans laquelle le soufre organique est dégradé par les bactéries en sulfate assimilable par les plantes.

L'immobilisation est le processus contraire. Les bactéries transforment le sulfate en soufre organique non assimilable.

La température du sol, le pH ou les conditions d'humidité qui affectent la croissance microbienne se répercuteront sur la minéralisation de la matière organique et sur la concentration et la quantité de sulfates assimilables par les végétaux.

L'oxydation est la réaction du soufre avec de l'oxygène afin de former du sulfate. Il s'agit d'un processus important puisque certains engrais sont des formes réduites de soufre et que cette transformation les rend assimilables par les végétaux.

La réduction est le processus contraire. Les sulfates sont débarrassés de leur oxygène en milieu anaérobie. Les sols qui sont mal drainés sont sujets à cette réaction et peuvent produire des composés sulfurés lorsque les

sols restent gorgés d'eau pendant des périodes prolongées.

Facteurs influençant les besoins en soufre

Ratios carbone:soufre

Le soufre subit bon nombre des mêmes réactions de minéralisation et d'immobilisation que l'azote dans le sol. L'ajout de résidus affichant un ratio C:S élevé (> 200:1) peut provoquer l'immobilisation du soufre et des carences temporaires de cet élément. Cette situation se produit plus souvent avec les résidus de cultures à maturité comme la paille qu'avec des résidus encore verts comme le trèfle ou des engrais verts.

Ratios azote:soufre

Le ratio N:S dans les tissus végétaux s'étend de 7:1 à 15:1, selon l'espèce et le stade de croissance. Les cultures qui reçoivent des apports importants d'azote alors que la réserve de soufre dans le sol est faible risquent d'afficher une carence induite en soufre. Les cultivateurs ontariens épandent actuellement communément de 10 à 20 kg/ha (de 9 à 18 lb/acre) de sulfates sur le canola au printemps, avec environ 130 kg/ha (116 lb/acre) d'azote.

Rôle du soufre chez les végétaux

Le soufre est un constituant de deux des 21 acides aminés qui forment les protéines. De plus :

- il facilite le développement des enzymes et des vitamines;
- il participe à la fixation de l'azote dans les légumineuses;
- il facilite la production des semences;
- il est nécessaire à la formation de la chlorophylle.

Le soufre donne son goût piquant au raifort et leur couleur, leur saveur et leur odeur caractéristiques à des plantes comme l'ail, l'oignon et le chou.

Carence en soufre

Les symptômes d'une carence en soufre sont semblables à ceux d'une carence en azote, sauf que la plante entière demeure vert pâle, puisque le soufre n'est pas mobile dans les végétaux.

Symptômes

Maïs :

- chez les petites plantes, jaunissement général du feuillage, rabougrissement, maturité retardée.

Légumineuses, y compris soya et luzerne :

- feuilles petites, vert jaunâtre dans le haut de la plante;
- tiges minces, érigées, ligneuses et allongées.

Céréales :

- jaunissement internerval des plus jeunes feuilles (consultez la dernière page).
- talles redressées.

Pommes de terre :

- plante entière vert pâle;
- en cas de carence sévère, enroulement des folioles vers le haut.

Canola :

- nouvelles feuilles vert jaunâtre aux nervures sombres s'enroulant vers le bas;
- stade végétatif — feuilles violacées s'enroulant vers le bas, cosses peu nombreuses, petites et parfois vides;
- carence en soufre pouvant se manifester à tout stade de croissance;
- une légère carence peut entraîner une bonne croissance végétative, mais des fleurs pâles et des cosses sous-développées;
- repousse du chaume après la récolte;
- manifestation possible de symptômes de carences causée par la pourriture des racines.

Cucurbitacées (concombres, melons) :

- symptômes d'abord visibles sur les jeunes feuilles;
- nervures légèrement plus claires que les zones internervales;
- rabougrissement;
- symptômes semblables à ceux d'une carence en N, sauf qu'ils se manifestent d'abord sur les nouvelles pousses.

Oligo-éléments

Les oligo-éléments sont aussi importants que les éléments nutritifs primaires et secondaires, mais sont nécessaires aux végétaux en beaucoup plus petites quantités et sont souvent présents en moins grandes concentrations dans le sol. La nécessité de ces éléments nutritifs varie selon la culture, la variété, les conditions du sol et la gestion de l'exploitation. Les réactions générales de cultures variées aux oligo-éléments sont présentées au tableau 2–8.

L'utilisation d'oligo-éléments a augmenté au fil du temps. Le besoin d'épandre des oligo-éléments peut augmenter en raison :

- de cultures continues à rendement élevé qui peuvent avoir appauvri les réserves du sol;
- d'engrais plus raffinés avec moins d'impuretés comme des oligo-éléments;
- d'une agriculture spécialisée laissant de moins en moins de champs disponibles pour les épandages de fumier;
- de la dégradation et de l'érosion du sol.

Tableau 2-8. Réaction des cultures aux engrais à base d'oligo-éléments**LÉGENDE :** — = données insuffisantes

Culture	Manganèse	Bore	Cuivre	Zinc	Molybdène
luzerne	faible	élevée	élevée	faible	moyenne
orge	moyenne	faible	moyenne	faible	faible
trèfle	moyenne	moyenne	moyenne	faible	élevée
maïs	moyenne	faible	moyenne	élevée	faible
haricots comestibles	élevée	faible	faible	élevée	moyenne
avoine	élevée	faible	élevée	faible	faible
seigle	faible	faible	faible	faible	faible
soya	élevée	faible	faible	moyenne	moyenne
blé	élevée	faible	élevée	faible	faible
asperge	faible	faible	faible	faible	faible
brocoli, chou-fleur	moyenne	élevée	moyenne	—	élevée
choux	moyenne	moyenne	moyenne	faible	moyenne
carottes, panais	moyenne	moyenne	moyenne	faible	faible
céleri	moyenne	élevée	moyenne	—	faible
concombres	élevée	faible	moyenne	—	—
laitue	élevée	moyenne	élevée	moyenne	élevée
oignon	élevée	faible	élevée	élevée	élevée
pois	élevée	faible	faible	faible	moyenne
poivron	moyenne	faible	faible	—	moyenne
pommes de terre	élevée	faible	faible	moyenne	faible
radis	élevée	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne
betterave rouge	élevée	élevée	élevée	moyenne	élevée
épinards	élevée	moyenne	élevée	élevée	élevée
betterave à sucre	élevée	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne
maïs sucré	élevée	moyenne	moyenne	élevée	faible
tomates	moyenne	moyenne	élevée	moyenne	moyenne
bleuets	faible	faible	moyenne	—	—

Les cultures affichant une forte sensibilité à un oligo-élément réagissent souvent à un apport de cet oligo-élément si la concentration de celui-ci dans le sol est faible. Les cultures affichant une sensibilité moyenne à un oligo-élément réagissent moins à un apport de cet oligo-élément, et les cultures dont la sensibilité est faible n'y réagissent habituellement pas, même lorsque le sol est très pauvre en cet oligo-élément.

Source : Vitosh, M.L., D.D. Warncke et R.E. Lucas, 1994. Publication E-486 : *Secondary and Micronutrients for Vegetables and Field Crops*. Université de l'État du Michigan.

Zn Zinc

Le zinc est relativement immobile dans le sol, de sorte que le lessivage ne pose pas de problème.

Le zinc susceptible de devenir assimilable par les plantes se présente dans la solution de sol sous la forme Zn^{2+} . Il est fixé aux surfaces de l'argile, de la matière organique et des minéraux du sol sous forme de zinc échangeable ou d'un complexe incluant de la matière organique.

Voici les conditions qui peuvent nuire à la biodisponibilité du zinc :

- pH élevé qui peut entraîner la formation de composés insolubles;
- adsorption sur les surfaces de l'argile, de la matière organique, des carbonates et des minéraux oxydés.

Le zinc est important au début de la croissance de la plante, ainsi que lors de la formation du grain et de la semence. Il joue un rôle dans la production de la chlorophylle et des glucides.

Carence en zinc

Les carences en zinc sont plus fréquentes dans les sols dont le pH est élevé, les sols avec de faibles concentrations de zinc sur lesquels de grands épandages de phosphore ont été faits, les sols sableux ou les sols érodés ou stabilisés où le sous-sol est exposé. Les carences peuvent également s'observer dans les sols organiques (terres noires).

On voit rarement une carence en zinc sur des sols sur lesquels du fumier est épandu, puisque le fumier contient généralement du zinc. Le fumier liquide de porc, par exemple, peut contenir plus de 85 g de zinc/m³ (environ 3,5 lb de zinc/5 000 gal), alors que le fumier solide de volaille peut contenir plus de 200 g/t (environ 2 lb par épandage de 5 tonnes).

Symptômes

Puisque le zinc est relativement immobile dans la plante, les symptômes de carence se manifestent d'abord sur le jeune feuillage.

Maïs :

- chlorose internervaire sur les nouvelles feuilles des jeunes plants;
- peut apparaître comme des bandes pâles ou blanches entre la bordure et la nervure médiane dans la partie inférieure de la feuille;
- en cas de carence grave, nouvelles feuilles naissant du verticille complètement blanches (bourgeon blanc).

Légumineuses, y compris soya et luzerne :

- tiges courtes et minces, feuillage vert pâle à bronzé avec taches jaunes et certaines nécroses;
- chlorose internervaire qui se propage et nervures qui paraissent vert foncé (contrairement à la carence en manganèse, la chlorose laisse voir davantage de taches).

Arbres fruitiers et fraises :

- chlorose des feuilles jeunes, halo vert le long des bordures en dents de scie des jeunes feuilles immatures;
- bourgeons stériles, feuilles petites et formation de rosettes (petites feuilles basilaires se formant sur de courtes pousses terminales et latérales de l'année).

Oignons :

- croissance rabougrie, feuillage rayé, tordu et jaune.

Toxicité du phosphore?

Les végétaux qui ont une carence en zinc ont une capacité altérée à réguler l'accumulation de phosphore. Conséquence de cela, le phosphore est prélevé par les plantes en quantités excessives. Voilà pourquoi l'analyse tissulaire décèle souvent une teneur élevée en phosphore chez les plantes présentant une carence en zinc.

Mn Manganèse

Dans le sol, le manganèse existe sous quatre formes principales : minérale, organique, échangeable et dissoute. La plus grande partie du manganèse prélevé par les plantes se présente sous la forme Mn^{2+} . Le sol contient de grandes quantités de manganèse, dont une faible partie seulement est assimilable.

Voici les facteurs qui influencent l'assimilabilité du manganèse :

- plus la valeur du pH augmente, plus le manganèse échangeable décline rapidement. La plus grande biodisponibilité survient à un pH entre 5,0 et 6,5;
- une teneur élevée en matière organique diminue l'assimilation du manganèse. Cela représente une préoccupation particulière dans la production de légumes sur des terres noires;
- un excès d'eau ou une mauvaise aération, qui amène une augmentation du manganèse soluble;
- d'autres éléments nutritifs comme l'azote (par exemple, l'engrais à base d'ammonium a un effet acidifiant, ce qui peut accroître le prélèvement de manganèse).

Le manganèse intervient dans la photosynthèse et la production de chlorophylle. Il aide à activer les enzymes qui participent à la distribution des régulateurs de croissance à l'intérieur de la plante.

Carence en manganèse

La carence en manganèse est plus fréquemment présente dans le soya cultivé sur des sols dont le pH est élevé et dans les cultures réalisées sur des terres noires et sur des sols minéraux à teneur élevée en matière organique. Des carences peuvent aussi survenir dans des champs récemment travaillés. Plusieurs maladies sont liées à une carence en manganèse. La pourriture des racines peut causer une carence en manganèse et une croissance réduite des racines provoquée par le nématode à kyste du soya (NKS) peut aggraver la carence en manganèse.

Symptômes

Soya, haricots blancs :

- conditions chlorotiques sur les jeunes feuilles;
- nervures des feuilles qui restent vert sombre, tandis que le tissu internervaire jaunit (consultez la dernière page).

Petites céréales :

- feuilles jaune pâle, rabougrissement, extrémités tardives qui deviennent grises ou blanches (tache grise de l'avoine).

Betterave rouge, betterave à sucre :

- feuilles naines qui roussissent et s'enroulent.

Laitue, céleri, oignon :

- jaunissement des feuilles, rabougrissement du plant et retard de maturité.

Une application foliaire effectuée en début de saison est un traitement plus efficace contre les carences en manganèse que les applications racinaires, car ces dernières convertissent rapidement le manganèse en des formes non assimilables.

Les apports de manganèse appliqués au sol peuvent être utiles dans des sols acides, sableux. Les épandages en bandes provoquent une biodisponibilité plus grande du manganèse que les épandages en pleine surface.

Remarque :

Sur les pommes Red Delicious et sur certains cultivars de pêches, l'excès de manganèse peut survenir sur des sols à texture grossière lorsque le pH est inférieur à 5,0.

Les symptômes sont des boursouffures sur l'écorce reposant sur des taches brun foncé. Il peut être possible de corriger cela en ajoutant de la chaux afin de hausser le pH.

B

Bore

Le bore est présent dans le sol comme solution de sol, bore adsorbé et bore minéral. Le prélèvement du bore par les plantes est lié au pH. La biodisponibilité de cet élément est maximale à des pH entre 5 et 7. La biodisponibilité diminue en périodes de sécheresse.

Le bore joue un rôle important dans l'intégrité structurale des parois cellulaires, la nouaison et le développement des semences, ainsi que dans le métabolisme des glucides et des protéines.

Remarque :

Les besoins des cultures en bore et leur tolérance à cet élément varient grandement. La démarcation entre la carence et la toxicité est mince. Des symptômes de toxicité au bore se sont manifestés dans des semences et des cultures de maïs sucré et de soya succédant à des cultures de betterave rouge traitées au bore. Utiliser le bore avec prudence et en tenant compte de la rotation des cultures.

Carence en bore

Les carences en bore sont plus susceptibles de se manifester dans les conditions suivantes :

- sols secs;
- pH du sol extrêmes;
- sols pauvres en matière organique;
- sous-sols exposés ou érodés.

Symptômes

Les symptômes de carence en bore varient grandement d'un végétal à l'autre. Le bore est très peu mobile dans la plante.

Rutabaga :

- centre creux, zones brunes aqueuses (centre aqueux).

Céleri :

- tige fendillée à rayures brunes (griffures de chat), cœur noirci.

Choux :

- tiges creuses, pommes brunes, bourgeons déformés.

Pommes :

- fruit petit, aplati ou mal formé, nombre réduit de pépins, liège interne, craquelure et roussissure du fruit, bourgeons terminaux morts, feuilles naines, cassantes, raides, s'enroulant vers le bas, flétrissement des bouquets floraux.

Luzerne :

- feuilles supérieures jaune rougeâtre, entre-nœuds courts, faible grenaison, feuilles terminales en rosette, bourgeons terminaux morts (consultez la dernière page).

Betterave à sucre, betterave rouge, épinards :

- jaunissement des feuilles, taches, craquelure des racines.

Céréales :

- incidence accrue de l'ergot.

Cu **Cuivre**

Le cuivre se trouve dans la solution de sol, sur les sites d'échange de l'argile et de la matière organique, dans les oxydes du sol, les résidus biologiques et les organismes vivants. Une forte proportion, soit de 20 % à 50 % dans certains sols, est retenue sous des formes fixées à la matière organique.

Voici les facteurs qui influencent la biodisponibilité du cuivre :

- texture, car les concentrations de cuivre sont plus faibles dans les sables;
- pH du sol, du fait que la mobilité du cuivre diminue à mesure que le pH augmente;
- teneur du sol en matière organique, la biodisponibilité étant extrêmement faible dans les sols organiques (terre noire) et peut également être faible dans les sols à très faible teneur en matière organique.

Certains éléments nutritifs (comme le zinc, l'aluminium, le phosphore et le fer), s'ils sont présents en fortes concentrations, réduisent le prélèvement du cuivre par les plantes.

Le cuivre joue un rôle dans la production de la chlorophylle, agit comme catalyseur pour les enzymes, et interviendrait peut-être dans la suppression des maladies.

Carence en cuivre

Les carences en cuivre sont plus fréquentes dans les cultures cultivées sur des sols organiques (terre noire) et des sols sableux, à pH élevé et bien drainés.

Symptômes

Carotte :

- racine pâle.

Oignons :

- dépérissement du bout des tiges qui deviennent étroites et tirebouchonnées, tuniques minces et jaune pâle.

Céréales :

- feuilles tirebouchonnées (les pointes des feuilles meurent et peuvent s'enrouler et se tirebouchonner);
- retard dans l'élongation des tiges;
- absence d'épis;
- teneur en protéines peut être inhabituellement élevée.

Laitue :

- feuilles manquant de fermeté, tiges jaune délavé.

Depuis que des carences en cuivre ont été observées dans l'Ouest canadien au début des années 1980, des chercheurs ont identifié des millions d'acres de terres dans les Prairies qui présentent une carence en cet élément nutritif indispensable. La carence en cuivre n'est pas fréquente en Ontario.

Remarque :

Le cuivre est nécessaire dans les rations alimentaires des porcs, de la volaille et du bétail, mais est toxique pour les moutons à des concentrations assez faibles.

Depuis quelques années, l'épandage de fumier de porc sur des terres utilisées pour la production de foin ou de pâturage soulève des inquiétudes quant à la toxicité du cuivre pour les élevages de moutons. Le fumier de porc contient de 2 à 50 ppm et plus de cuivre, la moyenne se situant dans les 10 ppm. Comme les plantes fourragères ou de pâturage prélèvent le cuivre, elles risquent d'être toxiques pour les moutons qui les consomment. Le cuivre peut s'accumuler dans les sols qui font l'objet d'épandages répétés de fumier de porc.

Cl

Chlore

Le chlore est généralement présent dans la nature sous la forme de chlorure (Cl^-). Dans le sol, le chlorure est facilement soluble, très mobile et facilement prélevé par les végétaux. Dans les sols de l'Ontario, les concentrations de chlorure demeurent basses en raison du lessivage. On peut trouver des concentrations plus élevées de chlorure dans le bas des pentes du champ où l'eau s'accumule, ce qui entraîne subséquemment des concentrations supérieures de chlorure dans le tissu végétal.

La biodisponibilité du chlorure n'est pas modifiée par le pH du sol. Le prélèvement et l'accumulation de chlorure dans les végétaux sont réduits par des concentrations élevées de nitrate et de sulfate.

Le chlorure dans les végétaux joue un rôle important dans la régulation stomatique et la circulation de l'eau. Le chlorure participe également à la photosynthèse.

Des recherches menées à l'extérieur de l'Ontario suggèrent que le chlorure aide à éliminer le piétin, la rouille des feuilles et les infections par *Septoria* dans le blé et l'orge, ainsi que la pourriture des tiges du maïs. L'application de potassium comme chlorure de potassium (0-0-60) peut fournir suffisamment de chlorure pour obtenir ces avantages.

Certains arbres à fruit et cultures de fruits de ronces sont sensibles au chlorure. Les chlorures représentent aussi une préoccupation pour le tabac en raison de leur effet sur la qualité de combustion.

« ... ure », toute une différence

Chlore ou chlorure

On s'inquiète des effets du chlore présent dans les fertilisants, notamment du chlorure de potassium, sur les bactéries du sol. En fait, les engrais renferment du chlorure.

Le chlore et le chlorure sont différents et ne s'utilisent pas de façon interchangeable. Leur comportement et leurs réactions dans le sol, ainsi que leurs effets sur les végétaux et les microorganismes sont complètement différents.

Le chlore (Cl_2) est un gaz corrosif et toxique qui sert à la fabrication des javellisants et des désinfectants. Dissous dans l'eau, le chlore gazeux forme un ion hypochlorite (l'ingrédient actif de l'eau de Javel). Le chlore liquide commercial (chlore gazeux comprimé) sert à la destruction des bactéries dans l'épuration des eaux. Tant l'hypochlorite que le chlore sont des bactéricides efficaces.

Le chlorure (Cl^-), par ailleurs, est la forme ionique du chlore qu'on retrouve dans la nature. Il est chargé négativement et est le plus souvent associé au sodium (sel de table) ou à d'autres ions à charge positive comme le potassium. Il n'est pas toxique et est facilement assimilable et utilisé par les plantes.

Comparez les concentrations de chlore et de chlorure dans l'eau. Le sel de mer, qui est fécond pour la vie bactérienne, renferme des niveaux de chlorure de l'ordre de 20 000 ppm. Les usines d'épuration des eaux visent habituellement des concentrations de chlore de 1,7 ppm afin de désinfecter l'eau.

Source : Eric Bosveld, The Agromart Group, 2006

Fe Fer

Le fer est abondant dans la plupart des sols, mais sa solubilité est très faible. La forme assimilée par les plantes est l'ion ferreux (Fe^{2+}).

Le fer remplit un certain nombre de fonctions chez les végétaux. Le fer :

- agit comme catalyseur dans la formation de la chlorophylle;
- est nécessaire à la respiration des plantes;
- joue un rôle dans la formation de certaines protéines.

Le fer est surtout utilisé par les gazonnières et les pépinières qui s'en servent pour donner une teinte vert sombre au feuillage.

Carence en fer

Les carences en fer sont rares en Ontario. Lorsque les bleuets et les rhododendrons sont cultivés sur des sols avec un pH supérieur à ce qui est recommandé, la carence en fer peut être un problème.

Voici quels sont, ailleurs dans le monde, les facteurs liés aux carences en fer :

- déséquilibre avec d'autres métaux comme le molybdène, le cuivre ou le manganèse;
- excès de phosphore dans le sol;
- phytogénétique;
- faible teneur en matière organique du sol;
- combinaison de pH élevé (> 7,8), de forte teneur en chaux, de sols humides et froids et de fortes concentrations de bicarbonate (chlorose induite par la chaux).

Symptômes d'une carence en fer :

Bleuets, rhododendrons :

- feuilles jeunes affichant une chlorose internervaire ou des rayures sur toute leur longueur;
- dans les cas graves, rabougrissement possible du plant.

Ces cultures donnent leur meilleur dans des sols acides, car elles ont un besoin élevé en fer.

Mo Molybdène

Le molybdène est présent dans le sol sous forme non échangeable dans les minéraux du sol, sous forme échangeable dans les oxydes de fer et d'aluminium, dans la solution de sol et fixé à la matière organique.

La biodisponibilité du molybdène est influencée par :

- pH du sol — lorsque le pH du sol augmente, la disponibilité du molybdène augmente également. La chaux peut améliorer la biodisponibilité sur les sols acides.
- Oxydes d'aluminium et de fer — le molybdène est fortement adsorbé sur ces métaux, ce qui le rend moins facilement assimilable.

Les plantes prélèvent le molybdène sous forme de molybdate (MoO_4^{2-}). Le phosphore améliore son absorption. Cependant, les carences sont plus susceptibles de survenir en présence de conditions de faible humidité du sol puisque cela réduit l'écoulement de masse et la diffusion. Il existe en outre des différences appréciables dans la sensibilité aux faibles concentrations de molybdène d'une espèce à l'autre et d'un cultivar à l'autre.

Le molybdène joue un rôle important dans le métabolisme de l'azote, à l'intérieur de la plante, ainsi que dans la fixation de l'azote chez les légumineuses. Il joue également un rôle dans la viabilité du pollen et la production de semence.

Carence en molybdène

Symptômes

Légumineuses :

- formation insuffisante des nodosités, symptômes de carence en azote.

Choux :

- premiers symptômes semblables à ceux d'une carence en azote ou en soufre : feuilles jaune pâle ou vert pâle, plants rabougris qui peuvent présenter des taches jaunes;
- petites zones nécrotiques sur le tissu foliaire, suivies de roussissures et d'un enroulement vers le haut du pourtour supérieur des feuilles (tige en fouet chez le chou-fleur).

Ni

Nickel

Les plantes prélèvent le nickel sous forme d'ions Ni^{2+} . En fortes concentrations dans le sol, le nickel peut provoquer l'apparition de symptômes de carence en zinc ou en fer en raison de la compétition entre ces cations. Le nickel est un élément nutritif indispensable aux légumineuses. Il est important dans la transformation de l'azote, étant l'une des composantes de l'enzyme uréase. La carence en nickel n'a pas été observée dans des terres agricoles.

Minéraux non essentiels

Même s'ils ne sont pas absolument indispensables à la croissance de toutes les plantes, les éléments nutritifs non essentiels peuvent l'être pour certaines ou pour le développement des animaux. Les minéraux non essentiels indésirables peuvent également poser un problème si leurs concentrations dans le sol atteignent des niveaux toxiques, en tuant ou en nuisant à la plante ou en transmettant la toxine à l'humain ou à l'animal qui mange la plante.

Minéraux bénéfiques

Cobalt

Le cobalt (Co) joue un rôle en formant la vitamine B12 et améliore la croissance des organismes qui fixent l'azote comme le rhizobium et les algues. Le cobalt a également un rôle dans la formation de la vitamine B12 chez les ruminants.

Sodium

Le sodium (Na) joue un rôle dans la régulation osmotique, facilitant le contrôle de la circulation de l'eau vers la plante et hors de celle-ci. Chez certaines plantes qui croissent dans des sols pauvres en potassium, le sodium peut remplir certaines fonctions du potassium.

Le sodium peut être toxique pour les plantes. Il est rare que de fortes concentrations de sodium soient observées dans les sols de l'Ontario compte tenu des fortes précipitations et du lessivage intense qui surviennent au printemps et à l'automne. Les zones avec de fortes concentrations en sodium sont habituellement associées à d'anciens puits de pétrole, à des déversements de saumure ou à l'application de sel sur les routes. La croissance végétale est réduite dans ces zones, en raison de la toxicité d'un excès de sodium et de la structure impropre des sols sodiques.

Silicium

Le silicium (Si) peut constituer jusqu'à 40 % des sols sableux non météorisés. Les graminées contiennent de dix à vingt fois plus de silicium que les légumineuses et autres plantes à larges feuilles.

D'après les travaux publiés, le silicium réduirait l'ombrage dans les champs en favorisant une croissance érigée, en diminuant la verse, en augmentant la résistance aux parasites racinaires et aux maladies des feuilles et des racines et en empêchant la toxicité de certains éléments nutritifs.

Vanadium

À de faibles concentrations, le vanadium (V) est bénéfique aux microorganismes, même si rien n'indique qu'il soit indispensable à la croissance des cultures. On pense qu'il remplit certaines fonctions dans la fixation de l'azote et qu'il peut jouer un rôle dans les réactions d'oxydation et de réduction biologiques.

Sélénium

Même si le sélénium (Se) n'est pas nécessaire aux végétaux, il doit se retrouver dans les aliments pour animaux afin que ces derniers restent en santé. Une carence en sélénium provoque la maladie du muscle blanc (forme de dystrophie musculaire) chez des animaux comme les bovins et les ovins. On retrouve de fortes concentrations de sélénium dans les sols de certaines régions d'Amérique du Nord à climats semi-arides ou arides comme la Californie. Toutefois, presque partout en Ontario, les sols affichent des carences en sélénium; aussi faut-il en ajouter aux aliments pour animaux ou en administrer par injection aux animaux pour les maintenir en santé. On peut aussi l'épandre comme engrais, mais cette pratique étant coûteuse, elle est rare en Ontario.

Il semble que les problèmes liés aux carences en sélénium chez les animaux d'élevage soient plus fréquents à la suite de saisons de croissance froides et pluvieuses qu'à la suite de conditions de chaleur et de sécheresse. L'usage d'engrais azotés pour augmenter le rendement des cultures fourragères réduit la teneur en sélénium des aliments pour animaux. La plante prélève la même quantité de sélénium, mais celui-ci se diffuse dans une plante plus grosse et davantage de biomasse, d'où une dilution de cet élément.

Éléments indésirables

Plomb

Le plomb (Pb) est un métal lourd habituellement associé aux déchets industriels, mais il peut être prélevé par les plantes. Les symptômes de toxicité sont semblables à ceux d'une carence en fer, soit un jaunissement de la plante avec une chlorose internervaire.

Mercure et cadmium

Le mercure (Hg) et le cadmium (Cd) sont des métaux lourds qui peuvent s'accumuler dans les tissus. De façon générale, ils ne posent pas de problème aux plantes, mais leur accumulation dans les tissus humains et animaux peut être lourde de conséquences.

Ce sont les concentrations de métaux lourds dans les boues d'épuration qui déterminent si celles-ci peuvent être épandues sur des terres agricoles et, le cas échéant, le taux et la fréquence d'épandage. Ces métaux ne se déplacent pas et ne se laissent pas éliminer sauf dans les tissus végétaux, de sorte qu'ils s'accumulent dans le sol.

Références

- Bennett, W.F., éd. 1993. *Nutrient Deficiencies and Toxicities in Crop Plants*. American Phytopathological Society.
- Brady, N. et R. Weil, 2016. *The Nature and Properties of Soils*. 15^e éd. Pearson Education Inc., Upper Saddle River, New Jersey.
- Grigera, M.S., R.A. Drijber et B.J. Wienhold, 2007. « Increased abundance of arbuscular mycorrhizal fungi in soil coincides with the reproductive stages of maize. », dans *Soil Biology and Biochemistry*. 39. 1401–1409.
- Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale et W.L. Nelson, 2005. *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. 7^e éd. Pearson Education Inc., Upper Saddle River, New Jersey.
- Hoeft, Robert, 2002. « Nitrogen Loss for 2002 », dans *University of Illinois Pest & Crop Bulletin* (02-03-05).
- Ozgen, S., J.P. Palta et M.D. Kleinhenz, 2006. « Influence of Supplemental Calcium Fertilization on Potato Tuber Size and Tuber Number. » *ISHS Acta Horticulturae 619: XXVI* International Horticultural Congress: Potatoes, Healthy Food for Humanity: International Developments in Breeding, Production, Protection and Utilization.
- Ro, C.U., R.J. Vet et J. Narayan, 2006. Données de champs analysées tirées de la base de données nationales sur la chimie atmosphérique (NATChem) et le système d'analyse. Direction des sciences et de la technologie atmosphériques, Direction générale des sciences et de la technologie, Environnement et Changement climatique Canada, 4905, rue Dufferin, Toronto (Ontario) Canada M3H 5T4.
- Sprague, Howard D., éd. 1964. *Hunger Signs in Crops*. David McKay Company Inc.
- Tian, H., R.A. Drijber, J.L. Zhang et X.L. Li, 2013. « Impact of long-term nitrogen fertilization and rotation with soybean on the diversity and phosphorus metabolism of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi within the roots of maize (*Zea mays* L.) », dans *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 164. 53–61.
- Van Eerd, L.L., K.A. Congreves, A. Hayes, A. Verhallen et D.C. Hooker, 2014. « Long-term tillage and crop rotation effects on soil quality, organic carbon, and total nitrogen », dans *Canadian Journal of Soil Science*. 94. 303–315.
- Vitosh, M.L., D.D. Warncke et R.E. Lucas, 1994. *Secondary and Micronutrients for Vegetables and Field Crops*. Université de l'État du Michigan, extension E-486.

Pour plus de détails

- Stanley A. Barber, 1995. *Soil Nutrient Bioavailability : A Mechanistic Approach*. John Wiley & Sons.
- Marschner, Horst, 2011. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3^e éd. Academic Press.

3. pH du sol, chaulage et acidification

pH du sol

Le pH du sol est une mesure de la concentration d'hydrogène de la solution de sol. L'échelle du pH varie de 0 à 14, 7 étant neutre, un pH inférieur à 7 étant de plus en plus acide et un pH supérieur à 7 étant de plus en plus basique. Pour chaque diminution d'une unité de pH, la concentration d'hydrogène augmente par dix. Par exemple, un sol dont le pH est de 4 a 1 000 fois plus d'hydrogène dans la solution de sol qu'un sol avec un pH de 7. À titre de référence, voici le pH approximatif de certaines matières : acide sulfurique, 0,5; vinaigre blanc, 3; eau pure, 7; bicarbonate de soude, 9; eau de Javel, 12 (consultez la figure 3-1).

Lorsque les niveaux de pH sont typiques dans un sol, la concentration d'hydrogène n'a pas par elle-même un impact appréciable sur une plante. Cependant, le pH peut avoir un effet sur d'autres éléments, notamment les éléments nutritifs dans le sol, et des effets directs et indirects sur l'activité des organismes terricoles à qui l'on doit la structure du sol, le cycle de la matière organique ou la fixation de l'hydrogène dans les nodosités sur les racines des légumineuses. Il a aussi un effet sur le rendement et la dégradation de certains pesticides.

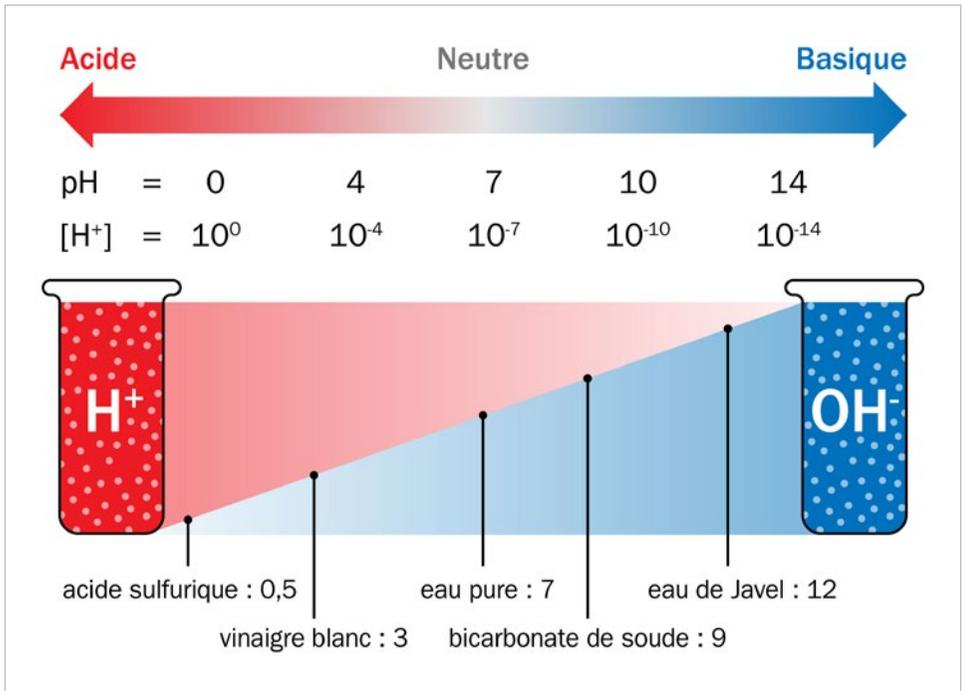


Figure 3-1. Échelle du pH présentant les concentrations relatives d'ion hydrogène (H⁺) et d'hydroxyde (OH⁻), ainsi que les valeurs de matières fréquentes

De façon générale, les végétaux ne prélèvent les éléments nutritifs que si ces derniers sont dissous dans l'eau. Le pH du sol influence la solubilité des éléments nutritifs de la plante et des autres éléments. Certains éléments nutritifs sont plus solubles à un pH élevé, d'autres le sont à un pH faible, tandis que d'autres encore le sont à des fourchettes de pH intermédiaires (figure 3–2). En raison de cette augmentation de la solubilité, certains éléments, dont l'aluminium et le manganèse, peuvent devenir toxiques pour la plante à de faibles niveaux de pH. Les espèces végétales n'ont pas toutes les mêmes exigences ni la même tolérance à l'égard des conditions du sol qui résultent de régimes de pH différents. Règle générale, cependant, elles possèdent toutes des gammes de pH qui fonctionnent mieux pour elles. La surveillance et la gestion du pH des sols sont donc l'une des premières mesures d'une bonne gestion des sols.

pH et solubilité des métaux

L'aluminium est contenu en grandes quantités dans des matières minérales du sol (sable, limon et argile). En général, plus le pH diminue, plus la solubilité des métaux dans le sol, notamment l'aluminium, augmente. Même si l'aluminium n'est pas un élément nutritif végétal, les végétaux le prélèvent. Au-dessus d'un pH de 5,7, les formes chimiques d'aluminium dans les sols ne sont pas toxiques pour les végétaux, mais lorsqu'il chute en dessous de 5,7, les formes d'aluminium qui peuvent être toxiques pour les végétaux augmentent rapidement à mesure que diminue le niveau de pH. Ces formes toxiques d'aluminium peuvent nuire aux racines des plantes en ralentissant l'allongement des racines. La plante continue de fournir des glucides aux racines pour alimenter la croissance, mais puisque l'allongement ralentit, les racines s'élargissent, ce qui

se manifeste par de courtes racines trapues qui ont une capacité limitée de prélever l'eau et les éléments nutritifs. Ces formes d'aluminium réagissent aussi avec le phosphore du sol, ce qui entraîne la formation de composés de phosphore avec une très faible solubilité qui ne sont pas biodisponibles pour les végétaux. Par ailleurs, les formes d'aluminium qui existent à un faible pH peuvent restreindre la formation de nodosités fixant l'azote sur les racines des légumineuses.

La solubilité d'un autre métal, le manganèse, augmente aussi rapidement lorsque le pH diminue (consultez la figure 3–2). Comme pour les éléments nutritifs des végétaux, une quantité insuffisante est un problème pour la croissance des végétaux, alors qu'une trop grande quantité peut être toxique pour la plante. Le pH auquel le manganèse commence à devenir toxique varie en fonction de la quantité de manganèse dans le sol, mais cela ne pose habituellement pas de problème tant que le pH ne baisse pas en dessous de 5,0. Cependant, l'augmentation du pH diminuera la biodisponibilité du manganèse, ainsi que la plupart des autres oligo-éléments (consultez le chapitre 2). Il est donc possible d'induire une carence en manganèse dans un champ lorsque de la chaux a été utilisée pour accroître le pH.

Les composés d'aluminium, de manganèse et de fer abondent dans les sols minéraux, mais pas dans les sols organiques (terres noires et tourbes). Cela limite la capacité de ces éléments d'interférer avec la solubilité d'autres éléments nutritifs dans les sols organiques. Un pH du sol plus bas est par conséquent plus acceptable pour les sols organiques que pour les sols minéraux (figure 3–2).

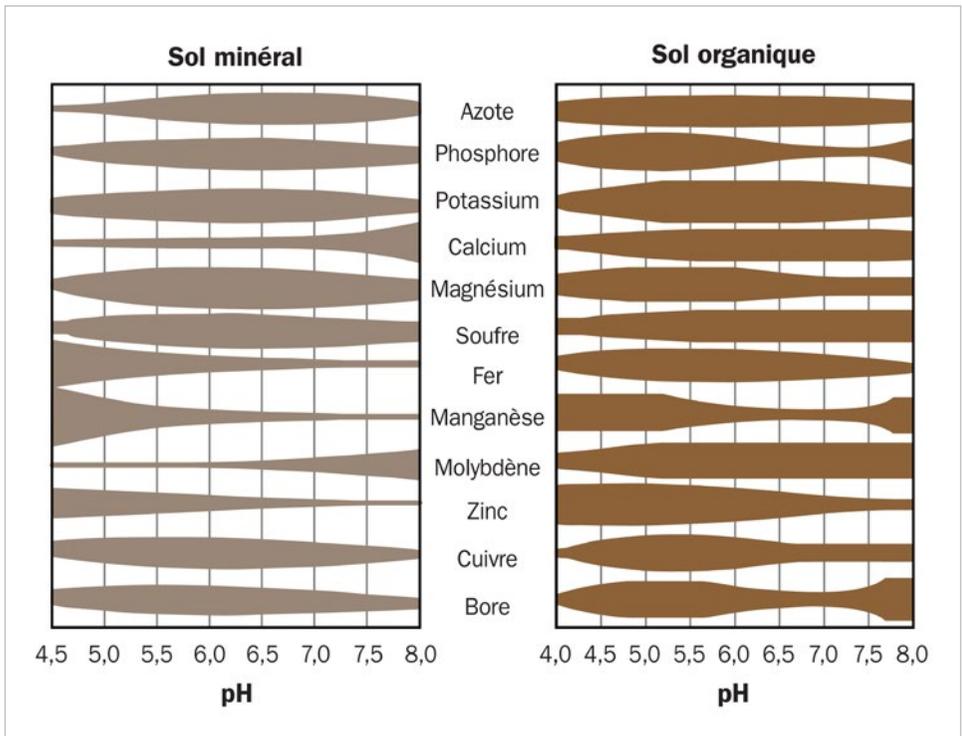


Figure 3-2. Effet du pH du sol sur la biodisponibilité des éléments nutritifs dans les sols minéraux et organiques

Facteurs influençant le pH du sol

Matériau d'origine

Le principal facteur qui influence le pH naturel d'un sol est les matériaux géologiques (matériau d'origine du sol) à partir desquels le sol s'est formé. Lorsque les glaciers se sont retirés de l'Ontario, il y a de cela de 10 000 à 15 000 ans, les matériaux qu'ils ont laissés derrière eux avaient un pH uniforme de la surface au soubassement. Ces matériaux étaient déposés directement par les glaciers, déposés par les eaux de fonte s'écoulant du front glaciaire qui s'est retiré ou sédimentés dans les eaux des lacs postglaciaires. La nature de ces environnements glaciaires a entraîné des différences dans les textures (sable, limon et argile) qui ont été laissées

derrière et ont ensuite constitué nos sols. Dans des régions comme Tillsonburg, où sont survenus des déplacements rapides d'eau causés par l'eau de fonte glaciaire, tous les matériaux ont été lessivés, à l'exception des matières plus grossières. Dans des régions où l'eau de fonte a formé des lacs, comme une partie importante des comtés d'Essex, de Lambton et de Kent, l'argile et le limon se sont déposés dans le fond, créant des sols vraiment riches en argile. Dans de grandes zones des comtés de Wellington et de Waterloo, le contenu des glaciers s'est simplement déposé sur le sol avec peu de triage effectué par l'eau, créant principalement des sols de loam.

La plupart des sols du sud de l'Ontario, de la vallée de l'Outaouais et de la ceinture d'argile du Nord se sont formés sur un matériau d'origine principalement

constitué de calcaire. Ce matériau entraînera un sol avec un pH d'environ 8,2. Cependant, des processus naturels et créés par l'homme ont mené à l'acidification des sols, entraînant une diminution du pH du sol au fil du temps à un point où des sols acides existent à certains endroits dans ces régions (figure 3-3). Les processus qui rendent les sols plus acides travaillent sur les couches de sol les plus près de la surface. Au cours des milliers d'années depuis le retrait des glaciers de l'Ontario, les couches de surface acidifiées se sont épaissies, puisque les acides ajoutés ont

réagi avec le calcaire contenu dans le sol. Les horizons de sol en profondeur sont inchangés par rapport à ce que les glaciers avaient déposé, et contiennent donc toujours de fortes concentrations de calcaire et un pH du sol légèrement basique. Cela se manifeste par un profil de sol typique qui est légèrement acide à neutre à la surface et qui est plus basique en profondeur. Le matériau d'origine de la plus grande partie du Nord de l'Ontario est principalement des matériaux géologiques acides ignés (Bouclier canadien), créant une prédominance de sols acides (figure 3-3).

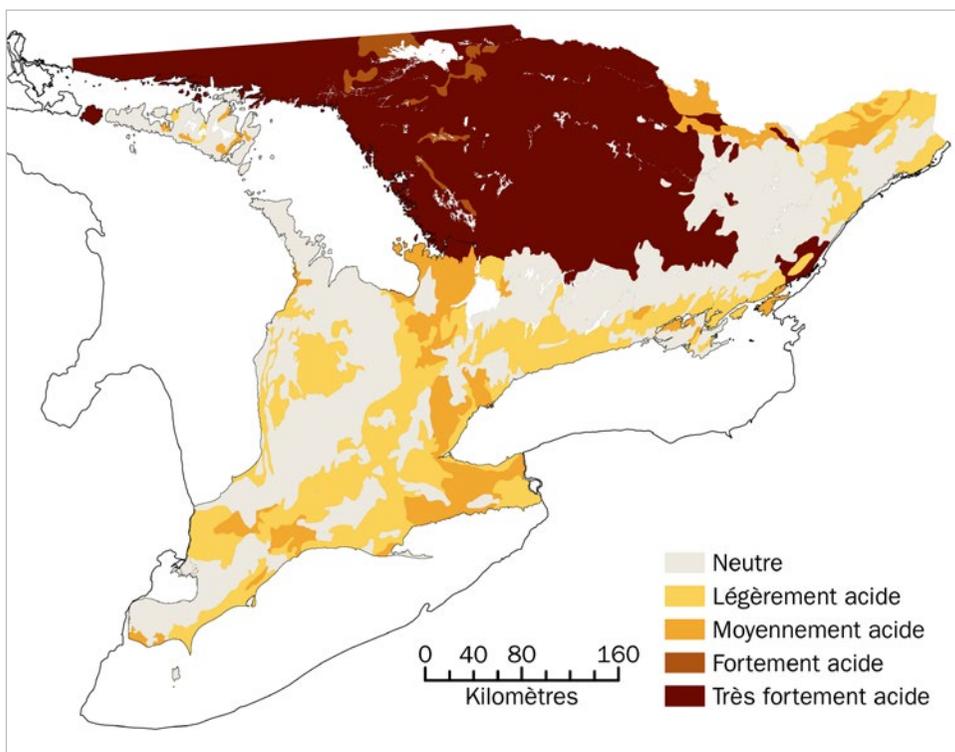


Figure 3-3. Réactivité de la surface du sol dans le Sud de l'Ontario. **Remarque :** Les catégories d'acidité ne représentent pas des plages définies de pH de sol, mais offrent plutôt une indication générale de variabilité comme un reflet du matériau d'origine.

En plus des matériaux géologiques dont est formé le sol, la capacité d'échange cationique du sol donne à celui-ci un pouvoir tampon (résistance au changement du pH du sol). La quantité et le type d'argile ainsi que la quantité de matière organique du sol auront un effet sur la rapidité à laquelle le pH d'un sol peut changer. Un sol à texture grossière et pauvre en matière organique aura donc une capacité relativement faible à résister au changement de son pH comparativement à des sols argileux riches en matière organique.

Acidification du sol

Précipitations

L'eau de pluie pure est légèrement acide en raison du dioxyde de carbone qui s'y trouve dissous et qui forme de l'acide carbonique. La quantité d'acide carbonique dans l'eau de pluie est directement liée à la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Lorsque les concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère augmentent, le pH de l'eau de pluie diminue légèrement. La quantité d'autres acides, comme l'acide nitrique et l'acide sulfurique, dépend de l'importance de la pollution atmosphérique. Au cours des 40 dernières années, on a constaté une diminution des émissions de soufre dans les régions qui ont un impact sur l'eau de pluie qui tombe dans le Sud ontarien. Cette réduction de la pollution signifie que l'eau de pluie dans le sud de la province est devenue moins acide. L'accumulation sur des milliers d'années d'acides qui pénètrent dans le sol sous l'effet des eaux de percolation, engendre une réduction graduelle du pH à la surface du sol. Il s'agit d'une étape normale du développement des sols sous les climats humides.

Décomposition de la matière organique

Au fur et à mesure qu'elle se décompose, la matière organique libère des acides organiques dans le sol. Ce processus contribue à la réduction du pH du sol dans les horizons superficiels, là où se trouve le gros de la matière organique.

Épandage d'engrais

La conversion microbienne de l'azote ammoniacal en azote des nitrates est l'un des processus biologiques qui libèrent de l'acide dans le sol. L'apport de grandes quantités d'engrais contenant de l'ammonium peut accélérer la baisse du pH, en particulier dans les sols sableux pauvres en matière organique.

L'urée et l'ammoniac anhydre ne renferment pas d'azote ammoniacal, mais sont convertis en azote ammoniacal lorsqu'ils entrent en contact avec le sol. Lorsque de l'azote sous forme d'ammonium, d'ammoniac ou d'urée provenant d'engrais ou de fumier est utilisé sur un sol sableux, le pH du sol doit être contrôlé périodiquement.

Alcalinisation du sol

Plusieurs sols agricoles de l'Ontario sont alcalins (pH supérieur à 7) à des profondeurs de seulement 30 cm (12 pouces) ou plus et présentent un pH aussi élevé que 8,2 à environ 1 m (39 pouces). Par conséquent, pour la plupart, les sols agricoles de l'Ontario offrent aux plantes amplement de réserves d'éléments nutritifs basiques comme le calcium et le magnésium dans la zone racinaire.

Si le pH du sol augmente au cours d'une série d'analyses de sol, voici les causes probables :

- La profondeur à laquelle les échantillons de sol sont prélevés a changé. Il est beaucoup plus facile de prélever des échantillons de sols à des profondeurs plus grandes lorsque le sol est humide et friable que lorsqu'il est sec ou compacté.
- Le travail du sol mélange du sol provenant de la partie profonde du profil avec le sol échantillonné. Certains agriculteurs y voient un moyen de hausser le pH sans procéder à un chaulage, mais cela parvient rarement à modifier le pH à un niveau désirable. Les effets néfastes sur la structure du sol et la dilution des éléments nutritifs et de la matière organique de la surface du sol avec le sous-sol doivent être pris en compte.
- L'excavation de fossés ou le drainage par canalisations a exposé le sous-sol qui fait désormais partie de l'échantillon de sol.
- L'érosion retire les couches superficielles les plus acides. L'affaissement du sol (oxydation, tassement et disparition) d'une couche de terre noire sus-jacente à un sol minéral a le même effet.

En Ontario, les précipitations sont supérieures aux pertes d'eau par évaporation et transpiration. Le déplacement net d'eau dans le sol se fait vers le bas et le mouvement net des cations basiques, vers le haut (bien que très lentement dans tous les sols, sauf les sols à texture grossière).

Les dépôts et les sols alcalins (saturés en sodium) s'observent dans les régions sèches comme les Prairies, où l'évaporation et la transpiration végétale dépassent les précipitations. Le résultat est que le mouvement net de l'eau est vers le haut, transportant les cations

basiques à la surface et rendant celle-ci plus alcaline.

Traitement des sols à pH élevé

Il est important d'évaluer les niveaux de pH du sol au moyen d'une analyse du sol. La fourchette optimale de pH du sol pour la plupart des cultures est de 6,0 à 7,5. Même au-delà de 7,5, l'effet du pH sur les grandes cultures est négligeable dans la plupart des cas. La biodisponibilité du phosphore est alors légèrement réduite, comme le révélera le dosage du phosphore. Tant que les quantités recommandées d'éléments nutritifs sont respectées pour une analyse de sol donnée, la culture ne devrait pas être affectée.

Il ne faut pas essayer de réduire le pH des sols alcalins. Si le pH du sol est très élevé (de 7,8 à 8,2), c'est que le sol renferme une forte concentration de chaux libre (carbonate de calcium). Son pouvoir tampon est alors extrêmement élevé, au point de faire avorter toute tentative d'abaisser le pH. L'apport de soufre pour acidifier le sol ne donnerait pas les résultats escomptés et coûterait cher.

Il faut surveiller les cultures pour y déceler tout signe de carences en éléments nutritifs découlant d'un pH élevé. Le plus souvent, ces carences sont des carences en manganèse dans le soya ou les céréales, et des carences en zinc dans le maïs. Si on constate une carence en manganèse, on doit envisager une application foliaire. Dans le cas d'une carence en zinc, ajouter du zinc à l'engrais de démarrage.

Symptômes de problèmes liés au pH

Un principe d'une bonne gestion du sol consiste à ajuster le pH du sol dans la plage optimale des cultures, puis de s'attaquer aux problèmes de fertilité du sol.

L'analyse du sol est le seul moyen fiable de déterminer si le pH doit être ajusté.

Cependant, certaines zones d'un champ peuvent présenter des symptômes liés à la présence d'un pH bas, même si le pH moyen du champ est acceptable. Ces zones, souvent des collines sableuses, doivent faire l'objet d'analyses distinctes.

pH du sol dans des bandes d'engrais de démarrage

Placés dans une bande, différents engrais ont différentes réactions de pH lors de leur dissolution initiale. Le diphosphate d'ammonium et l'urée élèvent au départ le pH, mais uniquement s'ils sont concentrés dans une bande. Le pH plus élevé peut entraîner la conversion de l'ammonium en ammoniac. Cet ammoniac peut être transféré du sol vers l'atmosphère et peut être très nuisible aux végétaux s'il entre en contact avec les plantules ou les racines. Même si le diphosphate d'ammonium présente un risque moins grand de dommage par l'ammoniac que l'urée par unité d'azote, il n'est pas recommandé d'utiliser de l'urée ou du diphosphate d'ammonium avec des semences de maïs. L'utilisation de diphosphate d'ammonium ou d'urée dans une bande située près des plantules (par exemple 5 cm [2 pouces] en dessous et à côté) devrait également être limitée, particulièrement en présence de conditions qui créent un risque élevé de dommage par l'ammoniac comme des conditions de sécheresses dans des sols à texture grossière dont le pH est supérieur à 7,0.

L'acidité dans une bande de P comporte en théorie des avantages liés à l'amélioration de la biodisponibilité du P dans les sols dont le pH est neutre ou plus élevé. Le pH dans une quelconque bande contenant de l'azote ammoniacal peut baisser temporairement dans les premières semaines qui suivent l'épandage. Lorsqu'une plante prélève de l'ammonium (un ion chargé positivement) comme source d'azote au lieu de nitrate chargé négativement, elle libère un ion hydrogène à charge positive pour équilibrer la charge à l'intérieur et à l'extérieur de la racine. Cela peut entraîner une diminution du pH du sol dans une zone d'environ 1 à 2 mm autour de la racine appelée rhizosphère. Même si elle est petite, cette zone représente la distance complète que le phosphore peut parcourir dans la racine au cours d'une année en raison de sa très faible mobilité. On a découvert que la réduction du pH de la rhizosphère découlant de ce processus accroît de façon importante le prélèvement du phosphore. L'acidification de la bande peut aussi se manifester parce que la nitrification (la conversion de l'ammonium en azote) produit de l'acidité. En plus d'accroître la biodisponibilité de P, le pH plus faible de la bande peut aussi augmenter la biodisponibilité de plusieurs autres oligo-éléments (p. ex. le zinc, le manganèse, le fer et le cuivre).

Voici certains symptômes qui peuvent indiquer un problème lié au pH du sol :

- courtes racines trapues;
- faible nodulation des légumineuses fourragères, malgré l'inoculation des semences (une coloration vert pâle est le signe d'une nodulation déficiente);
- récolte d'avoine seulement dans ce qui devait être un peuplement mixte de céréales (l'orge étant plus sensible aux sols acides);
- faible persistance des fourrages vivaces malgré une fertilisation et un drainage adéquats;
- présence de mousses et de mauvaises herbes, telles que le fraisier des bois, l'épervière orangée et la petite oseille;
- faible rendement des herbicides radiculaires à base de triazines, comme l'atrazine et la métribuzine;
- rémanence accrue de l'imazéthapyr (Pursuit).

Éviter d'établir un diagnostic uniquement sur la foi de ces symptômes. Il faut toujours faire confirmer les problèmes de pH par une analyse de sol.

pH tampon

H⁺ et sites d'échange cationique

Le pH du sol est une mesure de l'hydrogène contenu dans l'eau du sol, alors que le pH tampon est une mesure de la capacité du sol à résister à des modifications de son pH. Puisque l'hydrogène est un cation, il peut exister dans l'eau du sol comme sur les sites d'échange cationique du sol. Les charges négatives des sites d'échange cationique sont toujours toutes occupées par des cations à charge positive comme le calcium, le magnésium et l'hydrogène. Par ailleurs, tous ces cations se déplacent constamment dans et hors les sites d'échange cationique. Cela crée une concentration d'équilibre entre tous les

cations dans la solution de sol et ceux qui se trouvent sur les sites d'échange. Par conséquent, lorsque du nouvel hydrogène (acide) est ajouté dans le sol, l'équilibre entre l'hydrogène dans la solution de sol et l'hydrogène sur les sites d'échange est compensé et un nouvel équilibre se forme. Cela entraîne un certain déplacement de l'hydrogène nouvellement ajouté vers les sites d'échange.

Puisque seul l'hydrogène dans la solution de sol est mesuré dans le pH du sol, le fait qu'une partie de l'hydrogène nouvellement ajouté finit sur les sites d'échange réduit la portée des modifications du pH. De plus, même si les sites d'échange cationique sont toujours totalement occupés, ils ne peuvent pas être remplis au-delà de leur capacité. Un sol avec une capacité d'échange cationique plus grande peut donc retenir plus d'ions hydrogène, ce qui permet de les conserver à l'extérieur de la solution de sol et entraîne encore moins de modifications du pH lorsque des matériaux acides sont ajoutés.

Réserve d'hydrogène

Ce processus fonctionne aussi à l'envers. Lorsque vous tentez d'augmenter le pH en utilisant de la chaux pour réagir avec des ions hydrogènes en solution, plus d'hydrogène est libéré des sites d'échange afin de maintenir l'équilibre entre l'hydrogène sur les sites d'échange et ceux en solution. Cet hydrogène est souvent appelé « réserve d'hydrogène », et le processus grâce auquel le sol résiste aux modifications du pH est appelé le pouvoir tampon du sol.

Différences dans le pouvoir tampon

Le pouvoir tampon des sols dépend principalement de la quantité et du type d'argile dans le sol et de la teneur en matière organique du sol, des facteurs qui contribuent tous les deux à la capacité d'échange cationique d'un sol. Règle générale, plus la capacité d'échange cationique est importante, plus grand est le pouvoir tampon du sol. Une simple mesure du pH du sol ne reflète pas sa capacité à résister à des modifications du pH. Elle ne mesure que l'hydrogène qui se trouve dans la solution de sol.

Mesure du pH tampon

Le pH tampon (pH_B ou BpH dans les rapports d'analyse du sol) est une mesure directe de la capacité du sol à résister à une modification du pH. C'est une mesure du pH prise après que l'échantillon de sol a été mélangé avec une solution tampon. La solution elle-même résiste aux fluctuations du pH. Consultez le chapitre 5, *Analyses de sols, de tissus végétaux et de fumier*, pour de plus amples détails.

Le pH résultant du mélange du sol avec la solution tampon est bien corrélé à la quantité de pierre à chaux nécessaire pour ajuster le pH du sol à un niveau cible. La détermination du pH tampon est un moyen simple, peu coûteux et précis d'établir les besoins en chaux.

Les recommandations découlant du dosage des éléments nutritifs effectué lors des analyses de sol reposent sur la relation entre les concentrations révélées par les analyses de sol et la réaction des cultures à l'apport d'éléments nutritifs. La mesure du pH tampon diffère en ce qu'elle établit un lien entre les concentrations d'éléments nutritifs dans le sol et la réaction du sol à l'apport de chaux.

La recommandation actuelle sur la chaux dépend du pH cible du sol que vous souhaitez obtenir pour la culture, ainsi que du pH tampon. Différentes cultures exigent des plages de pH différentes, comme l'illustre le tableau 3–1.

Tableau 3–1. Lignes directrices pour l'application de chaux sur les cultures en Ontario

Cultures	pH du sol en-deçà duquel la chaux est bénéfique	pH cible du sol ¹
Sols minéraux à texture grossière et moyenne (sable, loams sableux, loams et loams limoneux)		
légumineuses vivaces, avoine, orge, blé, triticale, haricots, pois, canola, lin, tomates, framboises, fraises et toutes les autres cultures non énumérées ci-dessous	6,1	6,5
maïs, soya, seigle, graminées, foin, 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, triticale, soya, haricots, pois, canola, lin, tomates, framboises et toutes les autres cultures non énumérées ci-dessous	5,6	6,0
maïs, seigle, foin de graminées, pâturage	5,1	5,5
Sols organiques (mousses, terres noires)		
toutes les grandes cultures, toutes les cultures légumières	5,1	5,5

¹ Lorsqu'une culture est cultivée en rotation avec d'autres cultures exigeant un pH plus élevé (par exemple du maïs en rotation avec du blé ou de la luzerne), chalez le sol jusqu'au pH le plus élevé.

Après avoir déterminé le pH cible et avoir mesuré le pH tampon de votre sol, la quantité de chaux exigée peut être déterminée à l'aide des renseignements contenus dans le tableau 3–2. Les quantités de chaux recommandées dans le tableau 3–2 sont basées sur un amendement calcaire normalisé.

Différents amendements calcaires varient dans leur capacité à neutraliser le pH. Par conséquent, la quantité de chaux nécessaire doit être rajustée en fonction des propriétés particulières de la chaux utilisée.

Tableau 3–2. Chaux nécessaire pour corriger l'acidité du sol d'après le pH et le pH tampon du sol

Pierre à chaux broyée nécessaire — t/ha (en fonction d'un indice agricole de 75)

pH tampon	pH cible du sol* = 7	pH cible du sol = 6,5 (chaux si le pH du sol est inférieur à 6,1)	pH cible du sol = 6,0 (chaux si le pH du sol est inférieur à 5,6)	pH cible du sol = 5,5 (chaux si le pH du sol est inférieur à 5,1)
7,0	2	2	1	1
6,9	3	2	1	1
6,8	3	2	1	1
6,7	4	2	2	1
6,6	5	3	2	1
6,5	6	3	2	1
6,4	7	4	3	2
6,3	8	5	3	2
6,2	10	6	4	2
6,1	11	7	5	2
6,0	13	9	6	3
5,9	14	10	7	4
5,8	16	12	8	4
5,7	18	13	9	5
5,6	20	15	11	6
5,5	20	17	12	8
5,4	20	19	14	9
5,3	20	20	15	10
5,2	20	20	17	11
5,1	20	20	19	13
5,0	20	20	20	15
4,9	20	20	20	16
4,8	20	20	20	18
4,7	20	20	20	20
4,6	20	20	20	20

* Le chaulage jusqu'à un pH de 7,0 n'est recommandé que pour la maîtrise de la hernie dans les cultures de choux maraîchers.

Qualité de la chaux agricole

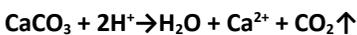
Deux paramètres sont normalement utilisés lors de l'évaluation de la qualité de la chaux agricole (c.-à-d. sa capacité à neutraliser le pH). Il s'agit de la valeur neutralisante et de l'indice granulométrique.

Valeur neutralisante

L'acidité est neutralisée lorsque les ions hydrogène (H^+) réagissent avec d'autres composés pour former de l'eau (H_2O).

Certains composés qui entrent dans les catégories générales des carbonates, des hydroxydes et des oxydes servent habituellement à neutraliser l'acidité. Les carbonates sont les plus couramment utilisés à des fins agricoles parce qu'ils sont immédiatement disponibles dans les roches calcaires sédimentaires qu'on retrouve dans nombre de régions de la province et qu'ils sont relativement peu coûteux.

Lorsqu'on utilise de la pierre à chaux broyée, ce sont les carbonates dans la chaux qui neutralisent l'acidité. Voici une réaction décrivant la façon dont le carbonate de calcium réagit avec deux ions hydrogène pour donner de l'eau et du dioxyde de carbone (CO_2). La flèche vers le haut indique que le dioxyde de carbone est produit sous forme gazeuse. Cela empêche jusqu'à un certain point la réaction de s'inverser.



Cette réaction est essentiellement la même que lorsque du vinaigre, un acide libérant des ions hydrogène, est ajouté à du soda à pâte (bicarbonate de sodium).

Les hydroxydes (OH^-) se combinent directement aux ions hydrogène (H^+) afin de former de l'eau (H_2O). Les oxydes de calcium, de magnésium et de potassium peuvent se combiner à l'eau afin de former des hydroxydes. Les amendements calcaires potentiels comme la cendre de bois qui contiennent des oxydes et des hydroxydes sont normalement le résultat d'un traitement thermique ou de la combustion. Ils ont habituellement un pH élevé et sont plus caustiques à manipuler que la pierre à chaux.

La valeur neutralisante d'un matériau représente sa capacité à neutraliser l'acidité par rapport à la capacité du carbonate de calcium pur. Puisqu'il s'agit d'une valeur relative, elle est exprimée comme un pourcentage de la capacité du carbonate ($CaCO_3$) de calcium à neutraliser l'acidité (consultez le tableau 3–3). Le carbonate de magnésium pur a une valeur neutralisante supérieure à celle du carbonate de calcium parce que les atomes de magnésium sont plus légers que les atomes de calcium. Toutefois, une molécule de carbonate de magnésium neutralisera autant d'acidité qu'une molécule de carbonate de calcium.

On n'utilise jamais de composés purs pour le chaulage, car ils sont trop coûteux. Normalement, de la pierre à chaux broyée est utilisée, dans laquelle au moins un de ces composés se trouve dans des proportions relativement élevées.

Le pH d'un matériau en suspension dans l'eau n'est pas un bon indice de sa capacité neutralisante. Par exemple, le pH d'un hydroxyde de potassium peut être supérieur à 13 (basique et caustique). Le pH d'une solution de carbonate de calcium peut n'être que de 8,2, mais constitue tout de même un agent de chaulage plus efficace.

Tableau 3–3. Valeurs neutralisantes de certains amendements calcaires

Amendement calcaire	Formule	Valeur neutralisante par rapport au carbonate de calcium
chaux calcitique (carbonate de calcium)	CaCO ₃	100
carbonate de magnésium	MgCO ₃	119
chaux dolomitique (carbonate de calcium et de magnésium)	CaMg(CO ₃) ₂	109
hydroxyde de calcium	Ca(OH) ₂	135
oxyde de calcium	CaO	179
hydroxyde de magnésium	Mg(OH) ₂	172
oxyde de magnésium	MgO	250
hydroxyde de potassium	KOH	90
gypse (sulfate de calcium)	CaSO ₄ · 2H ₂ O	0
cendres de bois	n/d	de 40 à 80

Le calcaire est une roche sédimentaire formée par les coraux dans les mers chaudes. La roche calcaire n'est pas des carbonates purs. Le limon, l'argile, le sable et d'autres matériaux se sont également accumulés dans le fond des océans. Le degré d'inclusion de ces contaminants influe sur la pureté du calcaire et, par conséquent, sur sa valeur neutralisante.

Indice granulométrique

Pour être efficace, l'amendement calcaire doit se dissoudre. Le calcaire ne se dissout pas rapidement, contrairement au sel ou au sucre, et sa vitesse de dissolution diminue avec l'augmentation du pH. Il est indispensable de maximiser l'aire superficielle du calcaire si l'on veut obtenir des vitesses de dissolution satisfaisantes. On y parvient en réduisant de beaucoup la taille des particules.

L'indice granulométrique des amendements calcaires se mesure à l'aide de tamis. Le numéro du tamis correspond au nombre de mailles qui se trouvent sur une distance d'un pouce à partir du milieu d'un fil. Un tamis n° 10 compte 10 mailles par 25 mm (un pouce), pour une ouverture de maille de 1,65 mm de côté.

Tout matériau passant à travers un tamis n° 60 (0,25 mm de côté) est considéré comme pleinement efficace. Un matériau qui passe à travers un tamis n° 10 (1,65 mm de côté), mais pas à travers un tamis n° 60, est considéré comme ayant une efficacité de seulement 40 %. Les matériaux qui ne passent pas à travers un tamis n° 10 sont considérés comme étant inefficaces. Le tableau 3–4 illustre comment l'indice granulométrique du calcaire est calculé.

Tableau 3–4. Détermination de l'indice granulométrique du calcaire

Dans cet exemple, 75 % de l'échantillon a traversé un tamis n° 10 et 40 %, un tamis n° 60.

Granulométrie	Pourcentage d'échantillon (A)	Facteur d'efficacité (B)	(A) x (B)
plus grossière que n° 10	25	0,0	0
entre n° 10 et n° 60	35	0,4	14
plus fine que n° 60	40	1,0	40
Indice granulométrique	100	—	54

Conformément aux normes fédérales, les pourcentages des matériaux qui passent à travers des tamis n° 10 et n° 100 (0,15 mm de côté) doivent figurer sur l'étiquette exigée pour les amendements calcaires. En Ontario, on utilise les tamis n° 10 et n° 60 pour déterminer la qualité de la pierre à chaux agricole. La texture devrait ressembler à de la farine finement moulue.

Habituellement, il n'est pas rentable de broyer des matériaux jusqu'à l'obtention de l'indice granulométrique nécessaire pour une pierre à chaux agricole efficace. La quantité utilisée en Ontario n'est que de 100 000 à 300 000 tonnes par année. À titre de comparaison, les ventes au détail d'engrais en Ontario ont atteint un sommet de 1 162 000 tonnes en 1985. Le calcaire est habituellement broyé à d'autres fins comme pour faire des agrégats pour la construction ou pour produire de la castine pour la fusion. Les matériaux fins ne conviennent pas à ces fins et sont tamisés. Ce sous-produit peut être tamisé encore plus pour obtenir de la chaux agricole.

Chaux dolomitique ou calcitique

Les amendements calcaires faits de roche calcaire broyée sont généralement divisés en deux groupes, calcitiques et dolomitiques, en fonction de leur teneur en calcium et en magnésium.

La carbonate de calcium pur (calcite) renferme 40 % de calcium. La dolomite pure renferme 21,7 % de calcium et 13,1 % de magnésium.

La distinction entre chaux calcitique et chaux dolomitique n'est pas toujours très nette. Toute chaux qui contient surtout du calcium et très peu de magnésium sera considérée comme de la chaux calcitique. D'après un sondage mené en 2006, il y aurait en Ontario huit sources de chaux dolomitique et huit sources

de chaux calcitique. (*Sources de chaux agricole en Ontario en 2006*. ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario, 2006)

Lorsque le chaulage est recommandé, on doit utiliser de la chaux dolomitique sur les sols dans lesquels le dosage du magnésium est de 100 ppm ou moins. Lorsque le dosage du magnésium donne une valeur supérieure à 100 ppm, on peut utiliser de la chaux calcitique ou de la chaux dolomitique. Nombre de sols de l'Ontario contiennent beaucoup de calcium ou de magnésium ou des deux. Des valeurs élevées obtenues lors du dosage de ces éléments ne posent pas problème et ne doivent pas influencer sur le choix du type de chaux (calcitique ou dolomitique).

Quiconque vend des engrais servant de sources de calcium ou de magnésium doit fournir une garantie d'analyse. Les teneurs en calcium et en magnésium du matériau s'expriment en pourcentage de Ca et de Mg.

Chaux liquide

Les suspensions de chaux et la chaux liquide sont des noms utilisés pour un système de mise en suspension de la chaux dans un fluide. La pierre à chaux utilisée dans des suspensions est généralement très fine et en suspension dans l'eau ou dans un engrais liquide. Règle générale, les suspensions contiennent de 50 à 75 % d'amendement calcaire, de 0,5 à 5,0 % d'argile et une petite quantité d'un agent dispersant. Le reste est constitué d'eau ou d'engrais liquide.

L'eau de chaux est habituellement associée à un indice granulométrique de 100 (traverse un tamis n° 100). La chaux qui passe à travers un tamis n° 60 est considérée comme étant efficace à 100 %. De la chaux plus finement broyée ne sera pas plus efficace.

Il n'a pas été démontré que la chaux liquide était plus efficace que la chaux ordinaire.

Chaux granulaire

Certaines entreprises promeuvent l'utilisation de la chaux granulaire. Ce matériau est constitué de chaux finement broyée formée en granulés d'une taille analogue à celle des granulés d'engrais. Cette présentation aplanit nombre des problèmes de manutention et d'épandage que pose la chaux ordinaire, car elle permet d'utiliser le matériel d'épandage normal.

La chaux en granulés n'est pas plus efficace que de la chaux normale et la même quantité est nécessaire pour neutraliser le pH.

Le choix de l'amendement calcaire doit reposer sur le coût, la disponibilité et l'indice agricole du produit.

Autres agents de chaulage

Plusieurs sous-produits industriels peuvent être utilisés comme amendements calcaires — cendres de bois, poussière de ciment, chaux de betterave sucrière, boues de précipitation industrielles, scories et biosolides. Chacun doit être évalué pour sa capacité à neutraliser l'acidité, sa teneur en métaux, et parfois, pour ses composés organiques. Il faut obtenir un certificat d'autorisation

du ministère de l'Environnement, de la Protection de la nature et des Parcs (MEPP) avant de procéder à l'épandage de ces produits sur des terres agricoles. Les *Guidelines for the Utilization of Biosolids and Other Wastes on Agricultural Land*, disponibles dans les bureaux du MEPP ou auprès du ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO), décrivent les critères devant servir à l'évaluation des matériaux.

La pierre à chaux agricole a un pH d'environ 8,2. Certains autres agents de chaulage, par exemple la cendre de bois, peuvent afficher des pH beaucoup plus élevés. Il faut redoubler de prudence lorsqu'on manipule des matériaux à pH élevé. Des dommages aux plantules sont à craindre si les semis se font peu après l'incorporation au sol d'un matériau à pH élevé.

Indice agricole

L'indice agricole est un indicateur de la qualité de la pierre à chaux qui combine la valeur neutralisante et l'indice granulométrique en une seule valeur (consultez la figure 3-4).

L'indice agricole peut servir à comparer la capacité des pierres à chaux agricoles à neutraliser l'acidité du sol. Plus l'indice agricole est élevé, plus la pierre à chaux est efficace, à poids égal.

$$\text{Indice agricole} = \frac{\text{valeur neutralisante} \times \text{indice granulométrique}}{100}$$

Figure 3-4. Indice agricole

$$\text{Quantité de chaux à épandre} = \text{quantité recommandée} \times \frac{75}{\text{indice agricole de la chaux utilisée}}$$

Figure 3–5. Quantité de chaux à épandre

L'indice agricole moyen des pierres à chaux vendues en Ontario se situe aux environs de 75. Les recommandations concernant la pierre à chaux en fonction d'analyses de sol reconnues en Ontario qui figurent dans le tableau 3–2 reposent sur l'hypothèse que la pierre à chaux utilisée a un indice agricole de 75. Les recommandations de chaulage doivent être corrigées en fonction de l'indice agricole réel de la pierre à chaux utilisée. La figure 3–5 montre le calcul à faire.

Les indices agricoles des pierres à chaux qui ont été vendues en 2006 par dix-huit carrières ontariennes en 2006 variaient de 36 à 102. La moyenne était de 74 (*Sources de chaux agricole en 2006*. MAAARO, 2006).

Compte tenu du poids et du volume de la chaux agricole, les frais de transport à la ferme représentent la plus grande partie des coûts liés à son épandage. Pour cette raison, la solution la plus économique consiste à faire affaire avec la carrière la plus proche. Le coût par hectare doit être calculé en multipliant le coût de chaque source épandue dans le champ par la quantité de chaux nécessaire par hectare. Cette méthode permet de comparer les coûts selon la source d'approvisionnement.

Chaulage

Épandage

Les épandeurs d'engrais classiques ne sont pas conçus pour le chaulage, de sorte que la chaux bloquera le dispositif d'épandage. Il est conseillé d'utiliser des

épandeurs commerciaux conçus pour la chaux.

Vérifier le schéma de distribution en utilisant la même méthode que pour contrôler la distribution du fumier à l'aide d'un épandeur (étaier des feuilles de plastique de 1 m × 1 m [39 po × 39 po], collecter et peser la quantité de chaux étendue sur chaque feuille et comparer la chaux répartie sur la largeur de distribution).

Étant donné que la chaux est une poudre fine, le vent influence les schémas de distribution. Il est conseillé de procéder à l'épandage par temps calme. L'opérateur doit se protéger des risques d'inhalation de la poussière. Souvent, la chaux peut dériver sur de très grandes distances, même par vents modérés.

S'il faut stocker la chaux à la ferme avant l'épandage, la protéger des intempéries et du vent de même que de l'humidité, car si elle prend l'humidité, la chaux s'agglutinera en blocs inutilisables.

Incorporation

Puisque la chaux agricole ne se dissout pas rapidement, il faut la mélanger uniformément au sol pour qu'elle soit efficace. Les outils aratoires qui mélangent le sol, par exemple le pulvérisateur à disques (pulvérisateur déporté), sont les meilleurs pour cette tâche.

Dans les sols soumis au semis direct, corriger le pH devient un défi. Si la totalité de la couche retournée (15 cm [6 po]) est acide, la seule option pratique est de

retourner le sol pour incorporer la pierre à chaux.

Cela ne signifie pas que le chaulage et le semis direct sont totalement incompatibles. Dans les sols où se pratique le semis direct et où l'on a épandu en surface des engrais azotés, il peut se développer une mince couche de sol acide. Procédez à l'échantillonnage de la couche supérieure de 5 cm (2 po) afin de vérifier le pH de surface. On peut neutraliser l'acidité dans cette zone par des épandages fréquents de faibles doses de pierre à chaux.

Nombre d'exploitants épandent et incorporent une fraction du total de la chaux recommandée sur plusieurs années. Ils veillent ainsi à ce que la chaux soit plus uniformément répartie et mélangée par le travail du sol. Il s'agit d'une excellente mesure préventive, mais qui ne corrigera cependant pas un grave problème d'acidité.

Temps de réaction

La chaux agricole ne se dissout pas rapidement. La vitesse de dissolution dépend de la finesse de broyage de la pierre à chaux (consultez la figure 3–6). Par ailleurs, la vitesse de dissolution diminue à mesure que le pH du sol augmente (ce qui est l'objectif souhaité du chaulage). Une fois dissoute, la chaux doit se diffuser dans le sol et intervenir au niveau de l'acidité de la solution de sol et des sites d'échange cationique. Cette réaction mettra plus de temps à se produire lorsque les sols sont secs ou gelés. Par conséquent, il faut du temps pour que le chaulage produise son plein effet. Jusqu'à trois ans peuvent être nécessaires.

Il est particulièrement important, dans les cultures sensibles à un pH faible, par exemple la luzerne, de procéder au chaulage bien avant les semis.

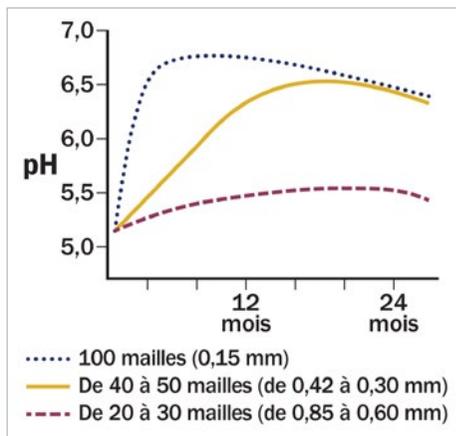


Figure 3–6. Temps de réaction pour des chaux de différentes granulométries

Que dire du gypse?

Le gypse n'est pas un amendement calcaire, même si on en vante largement la valeur comme source de calcium ou de soufre ou comme conditionneur de sol. Le gypse est utilisé comme conditionneur dans les sols sodiques (sols avec effet de relargage), que l'on retrouve dans les Prairies, mais non en Ontario.

Le gypse, qui est constitué de sulfate de calcium, se décompose en ions calcium et en ions sulfate lorsqu'il se dissout dans l'eau du sol. Même si le calcium déplace l'hydrogène des sites d'échange cationique, cet hydrogène se combine alors au sulfate dans la solution de sol pour former de l'acide sulfurique, de sorte qu'il n'y a aucun effet net sur le pH du sol.

On vante les mérites du gypse comme source de calcium parce qu'il est plus soluble que la chaux dans les sols alcalins. Même si cela est vrai, la solubilité demeure quand même faible (le gypse est le principal ingrédient du placoplâtre), de sorte qu'il en faudra de grandes quantités pour obtenir un apport appréciable de calcium. Il peut également constituer une bonne source de soufre là où le dosage de cet élément est faible.

Acidification du sol

Il arrive que des producteurs veuillent réduire le pH de leur sol. Cette opération s'impose dans la plupart des bleuetières commerciales de l'Ontario et dans les potagers devant servir à la culture du rhododendron ou de l'azalée. Ces plantes, qui prospèrent dans les sols affichant des pH entre 4 et 5, souffrent de carences en oligo-éléments dès que le pH du sol augmente au-delà de ces niveaux.

Certains producteurs qui doivent composer avec des sols alcalins (c.-à-d. dont le pH est de 7 ou plus), peuvent avoir l'impression qu'en abaissant le pH, ils amélioreront la biodisponibilité des éléments nutritifs. Cependant, comme la plupart des cultures prospèrent dans des sols ayant un pH entre 6 et 8, il y a plus à craindre d'un pH faible que des carences consécutives à un pH élevé. Sans compter qu'il est beaucoup moins coûteux d'enrichir le sol d'éléments nutritifs que d'en abaisser le pH.

Réduction du pH du sol

On abaisse le pH du sol en augmentant le nombre d'ions hydrogène dans le sol, soit directement par des ajouts d'acides ou en ajoutant des matériaux qui formeront des acides lorsqu'ils réagiront avec le sol. Les engrais azotés qui renferment de l'ammonium acidifient le sol, tout comme le fer et le soufre élémentaires ou le sulfate d'aluminium. Le soufre oxydé est disponible sous la forme de sulfate d'aluminium ou de sulfate de fer (ferreux), mais ces matériaux sont nécessaires en quantités beaucoup plus grandes (quatre fois et huit fois respectivement) que le soufre élémentaire.

Pour des cultures comme le bleuets, qui bénéficient d'une forte concentration de matière organique, l'ajout de mousse de tourbe acide aura le double effet d'enrichir le sol de matière organique et de réduire le pH du sol. Il importe de vérifier que le pH de la tourbe est faible, puisqu'il en

existe plusieurs marques qui augmentent le pH dans les mélanges d'empotage. Pour les grandes superficies, la mousse de tourbe est une solution trop coûteuse, que l'on réservera habituellement à la zone d'enracinement des plantes.

Pour obtenir des renseignements de base sur le pH du sol, il est conseillé de faire analyser le sol avant l'apport de soufre et trois mois après cet apport. Il est important de procéder à une analyse de sol annuelle afin de contrôler le pH.

Sols pouvant être acidifiés

Le succès des tentatives d'acidification du sol dépend du pouvoir tampon du sol. De façon générale, il est plus facile de modifier un sol sableux à faible teneur en matière organique et à capacité d'échange réduite qu'un sol argileux à forte capacité d'échange. Dans les sols ayant un fort pouvoir tampon, la réduction du pH du sol peut être de courte durée. L'autre facteur de l'acidification d'un sol est la quantité de chaux libre dans le sol. Les sols dont le pH est supérieur à 7 contiennent souvent des carbonates de calcium et de magnésium non dissous, qui réagissent immédiatement avec l'acide généré par le soufre, ce qui le neutralise et empêche le pH de baisser.

Le pH naturel du sol a également un effet sur la facilité de réduction du pH. Rappelez-vous que l'échelle de pH est logarithmique : passer de 7 à 5 est dix fois plus difficile que de passer de 6 à 5. Les sols dont le pH naturel est supérieur de deux unités au pH cible sont presque impossibles à modifier. Par exemple, s'il faut 750 kg de soufre/ha pour abaisser le pH du sol de 6 à 5, il en faudrait facilement 8 000 kg/ha ou plus pour abaisser le pH de 7 à 5, en plus d'une quantité suffisante de soufre pour neutraliser toute la chaux libre qui se trouve dans le sol lorsque le pH est plus élevé. Pour les potagers, il peut être plus pratique de remplacer le sol par un sol

acide ou de construire un lit surélevé de mousse de tourbe acide.

Il existe souvent, dans les champs, des zones qui résistent davantage aux tentatives de réduction du pH. Les symptômes de carence nutritive (p. ex., une carence en azote dans les cultures de bleuets) sont de bons indices des zones qui ont besoin d'un traitement particulier. Faire analyser et traiter ces zones séparément.

Utilisation du soufre

Le moyen le plus économique, quoique tout de même coûteux, d'abaisser le pH du sol est d'épandre du soufre (S). Cela nécessite un processus biologique dans lequel certaines bactéries du sol convertissent le soufre élémentaire en sulfate de soufre. Le processus donne lieu à la production d'acide. Voici les inconvénients que présente l'utilisation du soufre élémentaire :

- Il faut que le sol renferme une population viable des bonnes bactéries.
- Il s'agit d'un processus lent qui nécessite du temps, ainsi qu'une température et une humidité du sol appropriées à l'activité microbienne. Il faut de trois mois à un an pour que la réaction soit complète.
- Il faut, dans nombre de sols, répéter l'épandage de soufre chaque année, pour maintenir un pH faible.

Tableau 3-5. Soufre pour l'acidification du sol

Type de sol	Pour chaque 1,0 unité de pH	Pour chaque 0,1 unité de pH
sable	350 kg/ha (313 lb/acre)	35 kg/ha (31 lb/acre)
loam sableux	750 kg/ha (670 lb/acre)	75 kg/ha (67 lb/acre)
loam	1 100 kg/ha (980 lb/acre)	110 kg/ha (98 lb/acre)

Exemple : le pH initial d'un sol de loam sableux est de 6,2 et le pH cible pour le bleuet est de 4,8. Il faut réduire le pH du sol de 6,2 à 4,8, soit de 1,4 unité. Par conséquent, $1,4 \times 750 = 1\,050$ kg/ha de soufre doivent être épandus.

On trouve au tableau 3-5 les lignes directrices visant les épandages de soufre nécessaires pour abaisser le pH. Lorsque du soufre est épandu sur un sol pour en abaisser le pH, il faut l'épandre avant l'établissement de la plantation et l'incorporer dans l'ensemble du sol. Le soufre trituré agit plus rapidement que le soufre granulaire, mais est aussi plus coûteux et moins plaisant à épandre. Le soufre peut être épandu en toutes saisons.

Le tableau 3-6 propose des solutions de rechange à l'épandage de soufre élémentaire et précise les équivalences entre les produits offerts.

Tableau 3-6. Efficacité relative des réducteurs de pH du sol

Matière	Formule chimique	Teneur en soufre (%)	Quantité nécessaire pour neutraliser 100 kg de carbonate de calcium* (kg)
soufre élémentaire	S	100	32
soufre granulaire	S	90	36
acide sulfurique	H ₂ SO ₄	32	98
sulfate de fer	FeSO ₄ · 7H ₂ O	11,5	278
sulfate d'aluminium	Al ₂ (SO ₄) ₃	14,4	114
sulfate d'ammonium	(NH ₄) ₂ SO ₄	23,7	66

* Valeurs théoriques fondées sur la production d'acide consécutive à la réaction du produit avec le sol. S'attendre à une efficacité réelle réduite, parfois de moitié, les produits étant immobilisés à la surface du sol, dans les microbes du sol, ou prélevés par les cultures.

Références

Fixen, P.E., 1989. « Agronomic evaluations of MAP and DAP », compte rendu du congrès 1989 North Central Extension-Industry Soil Fertility Conference, St. Louis, MO. Potash & Phosphate Institute, Norcross, GA.

Miller, M.H., C.P. Mamaril et C.J. Blair, 1970. « Ammonium effects on phosphorus absorption through pH changes and phosphorus precipitation at the soil-root interface », dans *Agron. J.* 62:524–527.

MAAARO/MEO, 1996. *Guidelines for the Utilization of Biosolids and Other Wastes on Agricultural Land.*

Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario, 2006. *Sources de chaux agricole en Ontario en 2006.*

4. Échantillonnage

Échantillonnage de sol

Les agriculteurs prélèvent des échantillons de sol pour :

- préciser les besoins en engrais et en chaux;
- poser un diagnostic dans les zones à problème;
- surveiller le degré de fertilité des sols.

Prélèvement des échantillons

Le sol peut être analysé à tout moment, mais on procède généralement à ces analyses à l'automne, après les récoltes. Cela laisse suffisamment de temps pour que les résultats d'analyse reviennent du laboratoire et pour planifier la prochaine saison. L'idéal, pour des raisons d'uniformité, est d'échantillonner les sols à peu près au même moment chaque année et à la suite des mêmes cultures dans la rotation.

Dans la plupart des sols, un échantillonnage aux trois ans suffit. Les sols sableux peuvent nécessiter des échantillonnages plus fréquents, car le degré de fertilité de ces sols peut changer rapidement. Cela vaut particulièrement pour les cultures qui prélèvent de grandes quantités de potassium, comme celles de la tomate, du maïs à ensilage et de la luzerne. Une approche efficace consiste à échantillonner un tiers de vos champs chaque année afin que toute l'exploitation le soit à chaque trois ans. Lorsque survient un problème de fertilité particulier, échantillonner la zone concernée plus souvent est une bonne pratique. Prélevez séparément les échantillons dans les bonnes zones du champ et dans les zones appauvries.

Vous pouvez choisir de prélever un échantillon composite ou plusieurs échantillons ponctuels. Les échantillons composites représentent la fertilité de tout un champ à un coût plus bas. Le nombre de carottes nécessaires pour caractériser un champ dépend du relief et de la variabilité des sols à l'intérieur du champ, du type d'exploitation et du nombre ainsi que du type de cultures.

Prélèvement des échantillons

Aux fins des analyses de sol normalisées de l'Ontario, les carottes de sol sont prélevées à une profondeur de 15 cm (6 po), afin de refléter la fertilité des sols là où se trouve le gros de la masse racinaire pour la plupart des cultures. Quand les échantillons sont prélevés en superficie, les concentrations d'éléments nutritifs dans le sol se trouvent surestimées. À l'inverse, quand les échantillons sont prélevés plus profondément, les concentrations sont sous-estimées. Dans les champs contenant deux types de sols distincts ou plus, échantillonnez chaque type de sol individuellement. Faire aussi un échantillonnage distinct pour les zones à problème. Afin de vous assurer que les échantillons que vous prélevez sont représentatifs du champ, évitez de prélever des échantillons :

- aux abords de routes revêtues de gravier ou d'asphalte, car la poussière qui s'y accumule fausse les résultats des analyses de sol;
- dans les dérayures;
- sur les buttes très érodées;
- aux endroits où des déchets organiques ou de la chaux ont été empilés.

Si vous souhaitez des données précises sur l'une de ces zones, prélevez un échantillon séparé.

Remarque : Il est impossible de séparer un échantillon de sol humide en deux sous-échantillons sans matériel spécial. La plupart des variations de résultats entre des échantillons envoyés à différents laboratoires s'expliquent par le fait que les échantillons sont réellement différents.

Utiliser de l'acier inoxydable

Se procurer une sonde ou une tarière en acier inoxydable, plutôt qu'en métal galvanisé. Les seaux devraient être propres et fabriqués en plastique ou en métal non galvanisé, en particulier si vous échantillonnez des éléments nutritifs. Ces précautions évitent la contamination de l'échantillon. Puisque les laboratoires préfèrent utiliser une boîte à échantillon pleine, recueillir suffisamment de sol pour obtenir un échantillon composite qui remplira la boîte (consultez la figure 4-1).

Mélange

Bien mélanger les carottes dans le seau, en écrasant les mottes et en éliminant les pierres et les résidus de culture. Remplir la boîte ou le sac avec un échantillon représentatif du sol. Un échantillonnage et un mélange attentifs sont essentiels pour garantir la précision de l'échantillon composite.

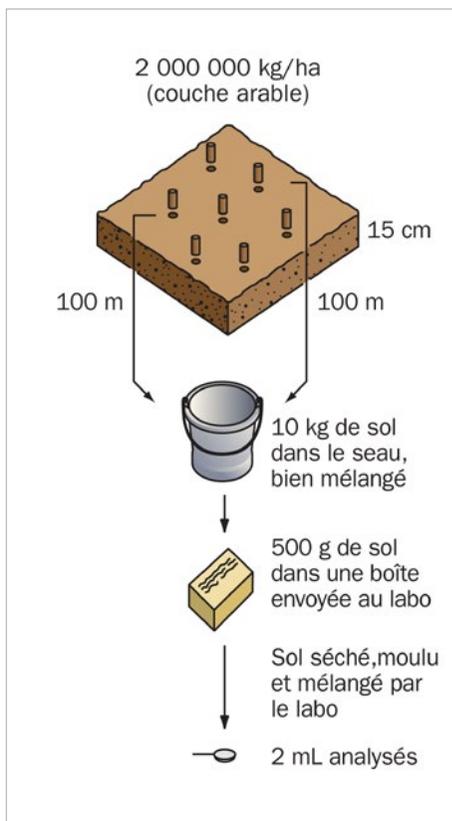


Figure 4-1. Du champ au seau au labo

Exception — échantillonnage du nitrate

Le nitrate du sol ne fait pas partie d'une analyse régulière du sol. Les recommandations sur l'azote comprises dans la plupart des rapports d'analyse du sol sont basées sur vos plans en matière de culture.

Le moment où sont prélevés les échantillons de nitrate est critique, parce que les concentrations de nitrate dans le sol varieront grandement tout au long de l'année en raison du lessivage et de l'activité microbienne. Prélevez des échantillons au moment des semis, dans le cas du maïs ou de l'orge, ou avant l'épandage d'engrais en bandes latérales sur une culture de maïs. Le prélèvement d'échantillons dans un épandage en bandes latérales détectera davantage de nitrate provenant de sources organiques comme du fumier ou des légumineuses. Les échantillons de nitrate sont prélevés à une profondeur de 30 cm (1 pi). Respectez le même schéma d'échantillonnage et la même procédure de mélange que pour un échantillon normal de sol.

Manipulez les sols avec soin. Entreposez-les à des températures inférieures à 4 °C jusqu'au moment de l'analyse. Dans le cadre d'une étude portant sur 66 sols de l'Ontario, des chercheurs (Oloya et coll., 2007) ont comparé l'entreposage d'échantillons de sol à 4 °C pour des périodes de 1 à 7 jours à la congélation ou au séchage à l'air des échantillons avant l'extraction.

L'analyse effectuée une journée après le prélèvement des échantillons a révélé qu'environ 70 % de l'azote inorganique était sous forme de nitrates et que les 30 % restants étaient sous forme ammoniacale. Comme les sols étaient entreposés humides à 4 °C pendant des périodes plus longues, l'ammonium se trouvait converti lentement en nitrates sous l'effet de la nitrification (figure 4–2). Cette conversion aurait été plus grande encore si les sols avaient été entreposés à la température de la pièce.

Les concentrations d'ammonium dans les sols augmentaient de 22 % sous l'effet de la congélation, et de 37 % sous l'effet du séchage à l'air. Les concentrations de nitrates aussi avaient augmenté, mais dans une moindre mesure. Par conséquent, la congélation ou le séchage à l'air n'est pas recommandé, en particulier lorsque les valeurs d'ammonium présentent un intérêt.

Il est recommandé que les sols soient entreposés à 4 °C et que l'extraction se fasse dans les quatre jours qui suivent l'échantillonnage, à la même teneur en eau qu'au champ.

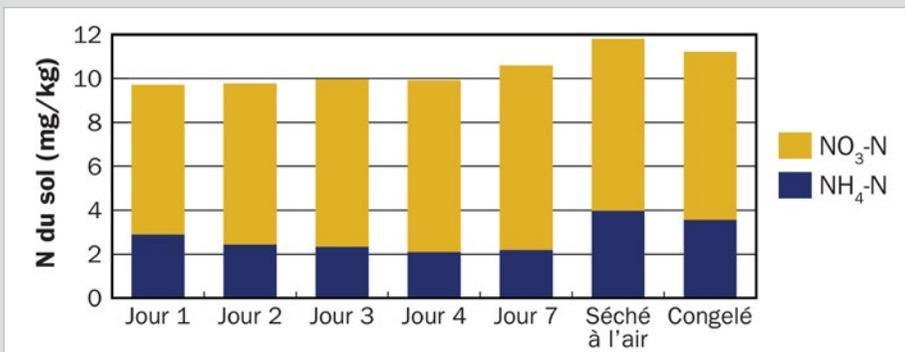


Figure 4–2. Effet de la manipulation des échantillons sur la teneur en azote minéral du sol
Source : Oloya, T.O., C.F. Drury et K. Reid, 2007.

que celle-ci est surtout influencée par la gestion, en particulier par les apports d'engrais et de fumier (doses et types) effectués dans chaque champ au fil des ans. Il est difficile de prédire les éléments nutritifs qui peuvent limiter le rendement dans un champ donné sans une analyse de sol. L'objectif d'un programme d'échantillonnage vise à prédire la concentration d'engrais la plus

rentable pour un champ ou la partie d'un champ. Afin de mettre sur pied un bon programme, il est important de connaître le potentiel de rendement économique de la gestion, la variabilité probable à l'intérieur de chaque champ et les ressources disponibles (consultez le chapitre 7 pour de plus amples renseignements).

Causes de la variabilité des sols

La variabilité découle des facteurs de formation du sol (matériau d'origine, topographie, activité biologique, climat et passage du temps), ainsi que de l'historique de gestion (travail du sol, fertilisation et résidus de culture).

La variation induite par le travail du sol est créée lorsque la charrue à socs et à versoirs et d'autres outils emportent le sol du sommet des collines et le déposent à flanc de colline. Ces déplacements de sol engendrent des zones pauvres en matière organique, peu fertiles et à pH généralement élevé (consultez la figure 4-4).

La variabilité de la fertilité des sols peut aussi être le résultat de plusieurs années d'application inégale d'engrais et de fumier. Les variations se trouvent amplifiées par la consolidation de petits champs en champs plus vastes. Les résidus de culture laissés à la surface du sol sans être épandus uniformément contribuent aussi à la variabilité de la fertilité.

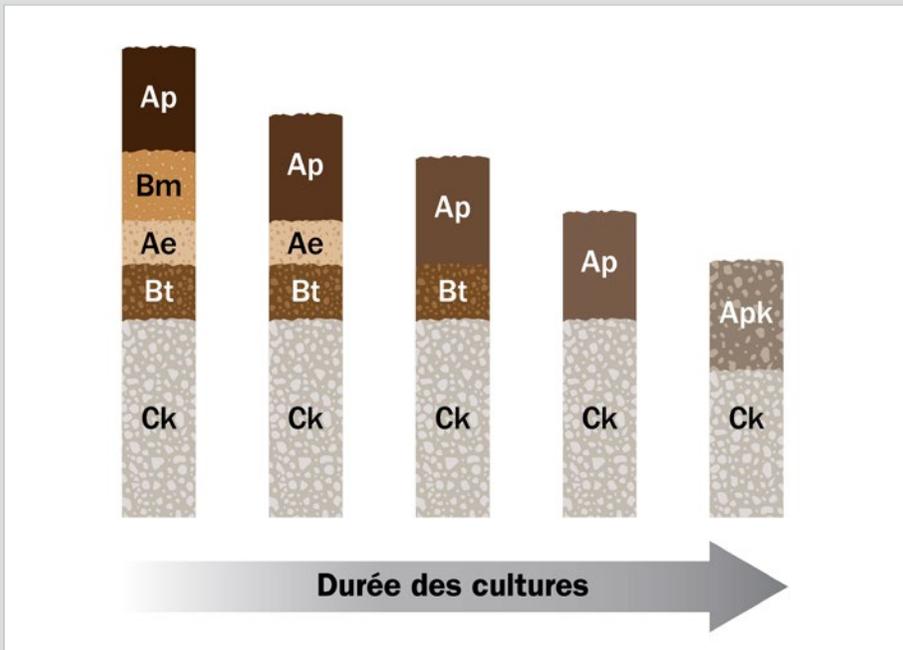


Figure 4-4. Le profil du sol change sur une colline au fil du temps en raison de l'érosion induite par le travail du sol. Le mélange de l'horizon Ap avec l'horizon Ck crée un horizon Apk qui contient de la matière organique diluée et un pH du sol élevé.

Stratégies d'échantillonnage

Échantillons composites

La stratégie d'échantillonnage du sol la plus fréquente consiste à prélever un échantillon composite dans chaque champ (figure 4-5). Habituellement, la taille maximale d'un champ pour un échantillon composite est de 10 ha (25 acres). Dans le but d'aplanir les variations observées à petite échelle, un même échantillon composite doit être constitué d'au moins 20 carottes, et ce, même si la superficie visée par l'échantillonnage est petite. Cette stratégie est appropriée lorsque :

- la valeur de la culture est faible;
- la fertilisation variable offre peu de potentiel;
- la fertilité des sol varie peu;
- la fertilité de l'ensemble du champ est suffisamment grande pour qu'un apport d'engrais n'entraîne aucune réaction observable.

Dans le cas des sols très peu fertiles selon les résultats d'analyse, il est généralement prudent de supposer que la totalité du champ réagira à la fertilisation. Si les résultats d'analyse de l'échantillon composite révèlent une très grande fertilité, selon toutes probabilités et en dépit de variations considérables, il n'y a pas lieu de s'attendre à une réaction à la fertilisation, pas même dans les zones pour lesquelles les résultats d'analyse indiquent les plus faibles niveaux de fertilité.

Pour des détails supplémentaires sur le développement des sols de l'Ontario, consultez le fascicule Les pratiques de gestion optimales : *Gestion du sol* publié par le MAAARO et Agriculture et Agroalimentaire Canada.

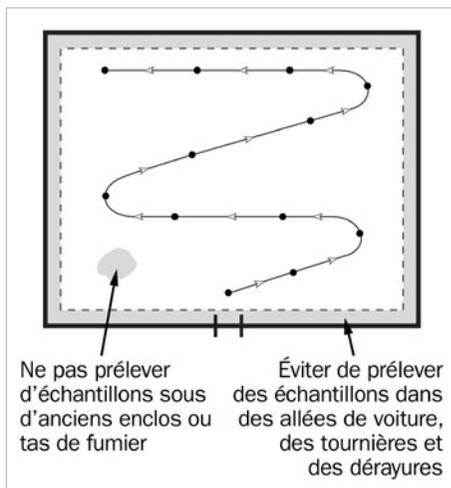


Figure 4-5. Échantillonnage composite

Géoréférencement (grille d'échantillonnage)

Le géoréférencement, ou échantillonnage systématique des sols, a recouru à la technologie du système mondial de localisation (GPS) et aux techniques des systèmes d'information géographique (SIG) pour recueillir des données sur les échantillons de sol et les géoréférencer, c'est-à-dire les délimiter précisément par des coordonnées cartographiques (figure 4-6). Cette technique est ce qu'on appelle une grille d'échantillonnage. L'espacement le plus fréquent entre les sites d'échantillonnage est de 1 ha (2,5 acres).

Une pratique courante consiste à tracer les limites des champs à l'aide du GPS et d'un logiciel de cartographie. On superpose à la carte une grille destinée à guider le prélèvement des échantillons. On consigne le lieu de prélèvement de chaque échantillon. La répartition uniforme des points de prélèvement confère une validité statistique à l'échantillonnage.

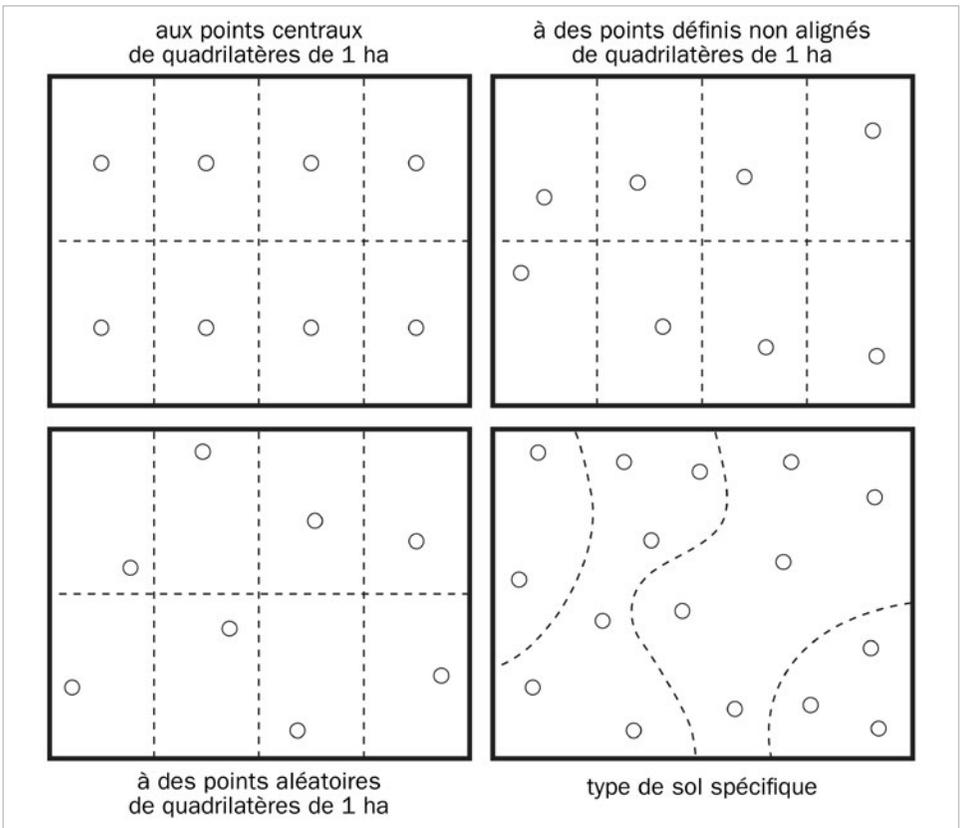


Figure 4-6. Échantillonnage géoréférencé

Une fois les échantillons analysés, un SIG effectue l'appariement des concentrations d'éléments nutritifs et des coordonnées géographiques. Pour un champ de 40 ha (100 acres), l'échantillonnage par quadrillage, qui divise le champ en quadrilatères de 1 ha (100 acres), fournit 40 résultats d'échantillonnage au lieu des 4 résultats normalement fournis par un plan d'échantillonnage composite. Le fait de disposer de 10 fois plus d'information sous forme de cartes permet de mieux discerner la variabilité spatiale des sols et de prendre ainsi des décisions de gestion plus éclairées.

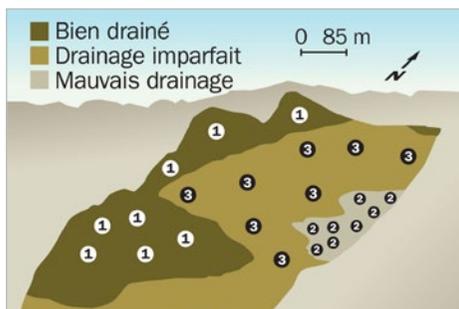


Figure 4–7. Zones de gestion de base en fonction de la topographie et du drainage

Échantillons des zones de gestion

Une pratique croissante consiste à procéder à l'échantillonnage par zone de gestion, ce qui nécessite de prélever un échantillon composite dans des zones distinctes du champ qui peuvent être gérées séparément.

Une grille d'échantillonnage peut être utile pour offrir une compréhension de base des zones de gestion, mais ne s'harmonise généralement pas avec la variabilité. Subdiviser un champ en zones en fonction du type ou des séries de sols, de la texture, de la topographie, du drainage ou des caractéristiques de la culture reste l'approche préférée. Une méthode simple consiste à faire un croquis de la variation connue de la texture ou de la topographie (consultez la figure 4–7), de l'historique du champ ou de l'épandage de fumier sur une carte, et à échantillonner ces zones séparément. Cela ne permet pas de générer automatiquement des cartes de prescription d'épandage, mais cela peut convenir à certaines exploitations.

Les mesures provenant de cartes de rendement ou d'élévation ou de données produites par des sondes de culture ou de sol peuvent servir à créer des zones de gestion. Les données d'élévation peuvent être obtenues d'un système de guidage ou d'un appareil agricole — un signal GPS de grande qualité convient mieux. Des cartes de rendement normalisé peuvent aussi

servir à circonscrire les zones du champ qui présentent constamment des rendements faibles ou élevés, selon un ou plusieurs types de culture. Les cartes de rendement peuvent être utilisées avec d'autres cartes et les connaissances de l'agriculteur afin de raffiner les zones d'échantillonnage. Une fois que les zones de gestion sont définies et échantillonnées, l'assignation de prescription d'intrants exige des connaissances agronomiques pour faire correspondre les recommandations aux caractéristiques de l'analyse de sol des zones particulières.

Pour des renseignements plus détaillés sur la définition des zones de gestion, consulter le chapitre intitulé Fertilité et éléments nutritifs de la Publication 811, *Guide agronomique des grandes cultures*.

Conditions d'échantillonnage particulières

Semis direct

Les recommandations de fertilisation reposent sur les concentrations d'éléments nutritifs dans les 15 premiers centimètres (6 po) de sol. Par conséquent, pour le dosage des éléments nutritifs, la profondeur d'échantillonnage est la même que l'on pratique le travail réduit du sol ou que l'on travaille le sol selon des méthodes traditionnelles. La stratification des éléments nutritifs peut survenir dans des systèmes de semis direct.

La situation est différente en ce qui a trait au pH du sol. Dans les systèmes de semis direct, l'épandage de l'azote à la surface du sol peut entraîner la formation d'une mince couche de sol acide. Pour vérifier si une telle couche s'est formée, prélever un échantillon distinct à faible profondeur (5 cm [2 po]).

Remarque : rajuster les recommandations de chaulage présentées au tableau 3–2 du chapitre 3, en fonction de cette faible profondeur d'échantillonnage.

Semis direct, travail en bandes, épandage en bandes et injection de fumier

Les champs où des semis directs ou un travail en bandes sont effectués depuis longtemps et qui ont un historique d'épandage en bandes ou d'injections de fumier représentent un défi supplémentaire parce que les ajouts d'éléments nutritifs sont concentrés dans des parties du champ.

Le tableau 4–1 peut servir de guide pour le prélèvement d'échantillons de sol dans des champs avec un historique d'éléments nutritifs en bandes. La stratégie d'échantillonnage dans ces scénarios nécessite de prélever des échantillons dans les zones du champ où les éléments nutritifs sont concentrés dans une proportion qui reflète le volume de sol qu'ils occupent.

Prélèvement d'échantillons de sol à des fins de diagnostic

Quand on soupçonne qu'une carence nutritive est la cause d'un ralentissement de croissance ou d'une réduction de rendement dans une partie du champ, il est important d'échantillonner ces zones séparément afin de confirmer le diagnostic. Aux fins de comparaison, échantillonner également les zones saines. Pour qu'il soit bien représentatif de la zone échantillonnée, chaque échantillon composite doit être constitué d'au moins 8 à 10 carottes. Les carences nutritives dont souffrent les végétaux peuvent être dues soit à une concentration inadéquate d'éléments nutritifs dans le sol, soit à une masse racinaire restreinte qui nuit au prélèvement des éléments nutritifs. Tout diagnostic doit tenir compte de ces deux facteurs.

Tenir un registre détaillé de l'emplacement des sites problématiques. Continuer d'échantillonner les zones problématiques chaque année ou tous les deux ans jusqu'à ce que la fertilité du sol soit rétablie.

Tableau 4–1. 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 superficiel en bandes, injecteur 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
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

Source : Publication 811, *Guide agronomique des grandes cultures* (édition 2017)

Échantillonnage de tissus végétaux

Les agriculteurs font l'échantillonnage de tissus végétaux qu'ils prélèvent :

- d'arbres fruitiers vivaces, de petits fruits et de vignes afin de préciser les recommandations de fertilisation;
- de cultures annuelles afin de diagnostiquer des problèmes de fertilité, particulièrement des carences en oligo-éléments.

Arbres fruitiers, petits fruits et vignes

Dans le cas des arbres fruitiers, prélever les échantillons de tissus entre le 15 et le 31 juillet. Dans le cas des vignes, prélever les échantillons de pétioles entre le 1^{er} et le 15 septembre. Ce sont les dates où les feuilles à maturité ont des teneurs en éléments nutritifs normales (tableau 4–2), teneurs auxquelles celles des échantillons pourront être comparées en laboratoire.

Tableau 4–2. Recommandations pour l'échantillonnage de tissus relatives au moment où procéder à l'échantillonnage et aux parties de végétaux à prélever

Culture	Moment	Partie de la plante
céréales	épiaison	deux feuilles supérieures
maïs	stade de 3 à 5 feuilles	plante entière (zinc et phosphore seulement)
	apparition des soies	tiers médian de la feuille de l'épi
haricots comestibles	première floraison	feuille supérieure entièrement déployée (3 folioles + pétiole)
espèces fourragères	bouton floral tardif	toute la partie aérienne
soya	première floraison	feuille supérieure entièrement déployée (3 folioles + pétiole)
brocoli, chou-fleur	début de la pomaison	nervure médiane de jeunes feuilles à maturité
choux	épiaison	nervure médiane de la feuille extérieure
carottes	mi-croissance	pétiole des jeunes feuilles à maturité
céleri	mi-croissance	pétiole des dernières feuilles déployées
laitue	épiaison	nervure médiane de la feuille extérieure
oignons	au moins 3 fois par saison	feuille la plus grande
pommes de terre	début, milieu ou fin de saison	pétiole de la 4 ^e feuille en bas de l'apex
épinards	mi-croissance	pétiole des jeunes feuilles à maturité
betteraves à sucre	12 semaines	feuille à maturité la plus jeune
tomates	début de floraison	pétiole de la 4 ^e feuille en bas de l'apex
bleuets	fin juillet, début août	feuilles développées prises dans la partie moyenne de pousses de l'année
raisin	du 1 ^{er} au 15 septembre	pétioles de feuilles développées de sarments fructifères — les détacher immédiatement des feuilles
framboises	fin juillet	feuilles entièrement déployées de tiges fructifères
fraises	fructifères: fin juin non fructifères: début jusqu'à la mi-août	feuilles entièrement déployées depuis peu : les détacher immédiatement du pétiole
arbres fruitiers	deux dernières semaines de juillet	feuilles développées prises à hauteur d'épaule dans la partie moyenne de pousses de l'année
tabac	écimage	dixième feuille depuis la cime

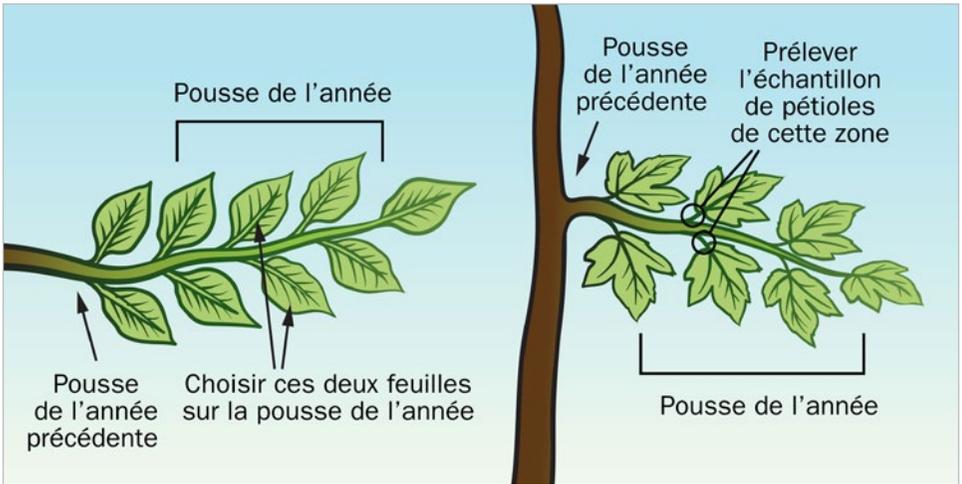


Figure 4-8. Localisation du point de prélèvement

Échantillonner séparément les arbres fruitiers de chaque cultivar, âge, porte-greffe et parcelle. Prélever au moins 100 feuilles pour chaque échantillon. Pour obtenir un échantillon représentatif, prélever 5 feuilles sur chacun de 20 arbres. Ne pas combiner feuilles saines et feuilles malades. Consultez la figure 4-8.

Dans l'échantillonnage des vignes à raisins, ne prélever que les pétioles de feuilles à maturité. Conserver les cultivars, porte-greffes et parcelles d'âges différents séparés. Idéalement, prélever les pétioles d'un certain nombre de différents rangs dans une parcelle. Prélever au moins 100 pétioles par échantillon. Dans le cas des hybrides Vinifera et français, prélever 150 pétioles.

Cultures de plein champ

Prélever au hasard à la grandeur du champ des échantillons provenant d'au moins 50 plants. Le laboratoire a besoin d'un échantillon d'un poids frais minimal de 250 g (9 oz).

Consulter le tableau 4-2 pour connaître le moment où prélever les échantillons afin que ceux-ci puissent être comparés aux valeurs normales. Prélever des échantillons à l'emplacement approprié sur la plante en fonction de son stade de croissance (tableau 4-2 et figure 4-9).

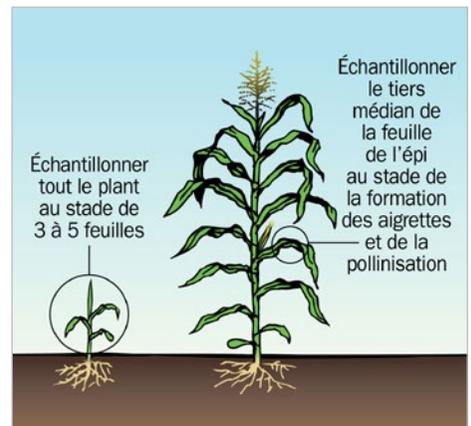


Figure 4-9. Localisation du point de prélèvement de tissu sur le maïs

Recommandations d'échantillonnage pour les cultures horticoles et les grandes cultures

Les erreurs les plus courantes lors de la collecte d'échantillons de tissus de plantes sont :

- ne pas recueillir suffisamment de tissus;
- recueillir des tissus chlorosés ou morts ou des feuilles endommagées par les insectes;
- recueillir des tissus de plantes contaminés avec du sol;
- envoi de l'échantillon dans des sacs de plastique.

Ne pas recueillir de tissus qui ont subi une application d'engrais foliaire.

Prélèvement d'échantillons de tissus à des fins de diagnostic

Les échantillons de tissus peuvent être précieux pour confirmer des carences nutritives, notamment des carences en oligo-éléments. Recourir à de bonnes techniques d'échantillonnage, telles qu'elles sont décrites plus haut, et veiller à prélever suffisamment de tissus végétaux pour que l'analyse puisse être effectuée. Échantillonner séparément les zones de croissance normale (bonne) et les zones atteintes (mauvaises). Ne prenez pas d'échantillons sur des plantes mortes (consultez la figure 4–10). Prélever aux mêmes endroits des échantillons de sol afin de vérifier son pH et l'équilibre nutritif.

Pour obtenir un diagnostic, vous pouvez prélever des échantillons en dehors des périodes recommandées. La teneur en éléments nutritifs ne correspondra donc pas nécessairement aux valeurs lors des périodes normales. Comparez les zones saines et les zones atteintes. Des concentrations critiques d'éléments nutritifs dans les tissus végétaux peuvent parfois prêter à confusion, car ces concentrations peuvent être élevées dans des plants sains du simple fait que les tissus ne sont pas assez abondants pour diluer les éléments nutritifs.

Expédition

Placer les échantillons de feuille ou de pétiole dans des sacs de papier, pas de plastique, à défaut de quoi ils sueront et pourriront. Étiqueter chaque sac de façon à pouvoir établir une correspondance entre les résultats d'analyse et la parcelle ou l'emplacement du champ d'où provient l'échantillon.

Tenue de registres

Pour chaque parcelle ou chaque champ échantillonné, tenir des registres précisant le cultivar et l'année. Conserver les résultats d'analyse avec les registres des épandages d'engrais, des conditions météorologiques et des rendements. Cela aidera à déterminer les tendances en matière de niveaux de fertilité.

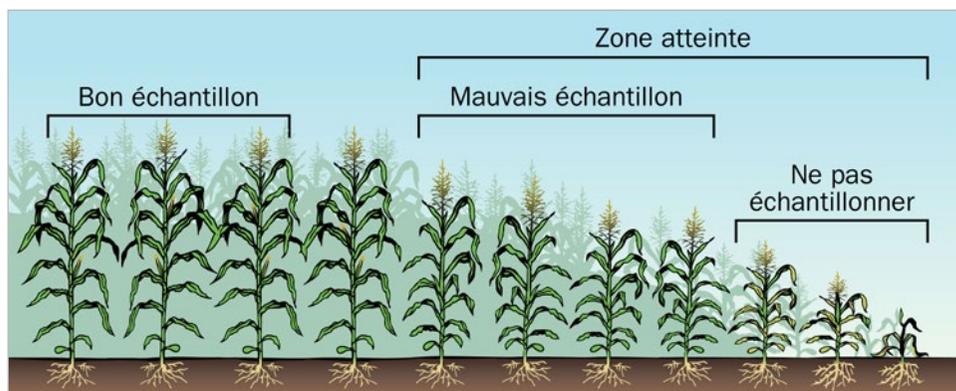


Figure 4–10. Échantillonnage des tissus pour diagnostiquer des problèmes

Échantillonnage du fumier

L'échantillonnage du fumier permet aux producteurs de déterminer :

- à l'avance, les quantités et le type d'éléments nutritifs à épandre;
- les apports d'éléments nutritifs supplémentaires à prévoir.

Échantillonnage du fumier liquide

Pour le fumier liquide, prélever un échantillon chaque fois que la structure de stockage est vidangée jusqu'à ce que vous acquériez une idée des valeurs moyennes des éléments nutritifs. Pour une même structure de stockage, la composition du fumier est différente selon que la vidange se fait au printemps ou à la fin de l'été.

Agiter complètement la structure de stockage. Dans un seau en plastique, prélever des échantillons à différentes profondeurs, au fur et à mesure de la vidange. Bien mélanger de dix à vingt de ces échantillons, puis transférer une partie du mélange dans un contenant en plastique.

Ne remplir le contenant qu'à moitié, pour éviter les risques d'une explosion consécutive à l'accumulation de gaz. Bien sceller le contenant et l'insérer dans un sac de plastique étanche.

Entreposer l'échantillon au frais jusqu'au moment de l'expédier.

Échantillonnage du fumier solide

Pour le fumier solide, prélever un échantillon chaque fois que la structure de stockage est vidangée jusqu'à ce que vous acquériez une idée des valeurs moyennes des éléments nutritifs. Par la suite, l'échantillonnage peut se faire à intervalles de quelques années ou lorsqu'un changement important intervient dans la source ou dans la gestion du fumier, comme des changements à la ration, à la litière ou aux méthodes de stockage.

L'échantillonnage aléatoire du fumier solide se fait plus difficilement. Prélever un échantillon de fumier (fourchée pleine) de chaque chargement à bord du véhicule d'épandage ou en différents points du tas de fumier et le déposer sur une surface propre en béton ou en contre-plaqué. Hacher le fumier à l'aide d'une pelle ou d'une fourche et mélanger le mieux possible les échantillons. Séparer l'échantillon composite en quatre portions et en jeter trois.

Continuer à mélanger et à séparer le fumier jusqu'à ce qu'il en reste juste assez pour remplir un contenant en plastique ou un contenant d'expédition — soit environ un demi-litre.

Fermer le contenant hermétiquement, l'insérer dans un sac de plastique et le conserver au frais jusqu'au moment de l'expédier.

Expédier les échantillons de fumier au début de la semaine, afin qu'ils parviennent au laboratoire avant la fin de semaine.

La composition du fumier varie d'une ferme à l'autre.

Plusieurs facteurs influencent la quantité d'éléments nutritifs présents dans le fumier. Certains types d'élevage produisent du fumier plus riche que d'autres en éléments nutritifs. Ainsi, le fumier de volaille renferme-t-il davantage de tous les éléments nutritifs que le fumier des élevages laitiers. Parmi les élevages de volaille, les élevages de poulets à griller produisent en général un fumier plus riche en éléments nutritifs, particulièrement en phosphore et en potassium, que les élevages de poudeuses.

La teneur en éléments nutritifs du fumier reflète habituellement le type

de ration offerte aux animaux. Ainsi, le fumier des jeunes animaux auxquels on sert des aliments concentrés affiche des concentrations plus élevées d'éléments nutritifs que celui de bétail nourri avec des aliments de moins bonne qualité. Des rations bien équilibrées procurent un maximum de rendement moyennant un minimum de rejets d'éléments nutritifs dans le fumier.

La quantité et le type de litière ont un effet sur la concentration d'éléments nutritifs dans le fumier. Les copeaux de bois affichent un ratio carbone:azote plus élevé (500:1) que la paille de céréales (80:1). Plus le ratio carbone:azote est élevé, plus grande est la quantité d'azote apte à se fixer pendant la dégradation des composés carbonés, ce qui influence la quantité d'azote biodisponible pour la culture.

L'ajout au fumier de liquide de dilution, quel qu'il soit, réduit la concentration d'éléments nutritifs dans le fumier.

Si l'on ajoute au fumier d'un élevage laitier les eaux de lavage de laiterie et les eaux de ruissellement des enclos, il faudra augmenter de beaucoup les taux d'épandage pour obtenir une fertilisation équivalente à celle que procurerait, par exemple, l'épandage d'un fumier produit par une porcherie dotée de trémies-abreuvoirs.

Les pertes attribuables au stockage peuvent avoir de grandes répercussions sur la teneur en éléments nutritifs du fumier. Les eaux qui s'écoulent d'un tas de fumier solide peuvent emporter avec elles de grandes quantités d'azote et de potassium, alors que la plus grande partie du phosphore reste liée sous des formes solides. Il ne s'agit pas seulement d'un risque pour l'environnement, mais aussi un gaspillage de ressources.

Échantillonnage pour diagnostiquer des carences et des toxicités dans le champ

Pour expliquer la présence de zones problématiques dans un champ, il faut garder l'esprit ouvert et étudier toutes les données disponibles. Au cours des opérations de dépistage, observer :

- les différences dans la structure, la texture, les horizons, le compactage et les résultats d'analyse de la fertilité du sol;
- les végétaux pour connaître leur stade phénologique, les cultivars, les dates de semis, les profondeurs de semis, la couleur des tissus pouvant révéler des carences et des maladies, la croissance racinaire;
- les effets des traitements phytosanitaires et les signes révélateurs de la présence d'ennemis des cultures, tels que mauvaises herbes, ravageurs et maladies.

Observer globalement les cultures dans la région. Examiner au moins l'équivalent d'une concession pour voir si le problème est très localisé ou s'il est répandu.

Observer d'abord le champ au complet avant d'inspecter un site spécifique. Si possible, comparer les zones saines et les zones problématiques. S'attarder aux configurations qui pourraient aider à cerner les causes de faible croissance :

- **Bandes ou motifs rectangulaires.** La cause peut être une mauvaise application, surtout si les bandes ou motifs sont présents à la grandeur du champ.
- **Maladies amenées par des vecteurs.** Le virus de la jaunisse nanisante de l'orge, par exemple, peut être propagé par des insectes. Il peut aussi être emporté par des vents dominants et laisser dans le champ un motif qui rappelle la neige

emportée par le vent. Lorsque les endroits situés du côté ombragé des arbres ont été épargnés, il y a lieu de soupçonner un problème amené par des vecteurs.

- **Zones compactées par les roues des véhicules.** Il peut s'agir d'un facteur positif ou négatif. Normalement, les roues des véhicules compactent le sol et nuisent à la croissance. En général, les zones compactées peuvent être mesurées et comparées à l'espacement des roues de la machinerie agricole. Il arrive qu'un tassement léger du sol occasionné par la circulation des véhicules améliore le contact sol-semence et favorise une levée plus hâtive, surtout dans les sols très meubles.

Les configurations peuvent être difficiles à déceler si elles apparaissent et disparaissent. Les problèmes peuvent ne pas être graves, mais si le sol ou les conditions météorologiques dans un champ changent même légèrement, ils peuvent s'aggraver. Par exemple, un champ où est présent le nématode à kyste du soya peut ne pas présenter de symptôme pendant des années, malgré une augmentation graduelle de la population. Le nématode peut se manifester dans les sections du champ soumises à un facteur de stress comme le compactage du sol.

Examiner les registres de production pour repérer les tendances générales touchant le rendement et la qualité. Le fait qu'un problème se manifeste dans toutes les cultures comprises dans la rotation ou dans une seule peut fournir une indication quant à la cause du problème.

Références

- Oloya, T.O., C.F. Drury et K. Reid, 2007. « Effect of soil storage on soil extractable ammonium and nitrate levels », données non publiées.
- Potash & Phosphate Institute, 2006. *Soil Fertility Manual*. PPI/PPIC, Norcross, GA 30092-2837 USA.
- Rehm, George W., Antonio Mallarino, Keith Reid, Dave Franzen et John Lamb, 2002. *Soil Sampling for Variable Rate Fertilizer and Lime Application*. NCR-13 Committee, offert par l'Université du Minnesota. (<https://store.extension.iastate.edu/product/Soil-Sampling-for-Variable-Rate-Fertilizer-and-Lime-Application>).

5. Analyses de sols, de tissus végétaux et de fumier

Pour que les cultures agricoles soient rentables, il faut tirer parti des éléments nutritifs qui sont présents dans les sols et, au besoin, combler les besoins des cultures par des apports d'éléments nutritifs suffisants dans chaque champ. Comme les sols affichent des niveaux de fertilité et les cultures des besoins en éléments nutritifs très variables, les quantités d'éléments nutritifs qui leur sont nécessaires varient aussi considérablement.

Les analyses de sols et de tissus végétaux sont des moyens de prévoir les doses d'application d'éléments nutritifs optimales pour une culture donnée dans un champ précis.

Les analyses de sol aident :

- à préciser les besoins en engrais;
- à déterminer le pH du sol et les besoins en chaux;
- à diagnostiquer des problèmes culturaux;
- à déterminer la pertinence d'épandre des biosolides;
- à déterminer la pertinence de traitements herbicides particuliers.

Les analyses de tissus végétaux aident :

- à déterminer les besoins en engrais des cultures fruitières vivaces;
- à diagnostiquer des carences nutritives;
- à diagnostiquer des cas de toxicité des éléments nutritifs;
- à valider les programmes de fertilisation.

Analyses de sol

Manutention et préparation

Lorsque les échantillons arrivent pour être analysés, le laboratoire :

- vérifie les demandes d'analyse et les échantillons pour s'assurer qu'ils correspondent;
- s'assure que le nom du client, les codes d'identification des échantillons et les demandes sont clairs;
- fixe les codes d'identification aux échantillons et aux demandes d'analyse;
- prépare les échantillons en vue de leur séchage au four en ouvrant les boîtes ou les sacs et en les plaçant sur des grilles de séchage;
- met les échantillons au four à 35 °C (95 °F) jusqu'à ce qu'ils soient secs (de 1 à 5 jours) (sauf les échantillons destinés au dosage des nitrates, qui doivent être analysés sans séchage);
- broie les échantillons séchés afin qu'ils passent au travers d'un tamis de 2 mm, enlevant les roches et les résidus de culture;
- emporte les échantillons au laboratoire, où les sous-échantillons sont analysés.

Résultats d'une analyse de sol

Les laboratoires commerciaux d'analyse de sol offrent différentes analyses de sol et différents forfaits d'analyses. La façon dont le laboratoire signale les résultats variera aussi d'un laboratoire à un autre. Il est important de choisir un forfait d'analyses qui répond à vos besoins. Les forfaits d'analyses comprennent pour la plupart les analyses suivantes : pH, pH tampon, phosphore, potassium et magnésium.

Le pH du sol est compris dans presque toutes les analyses de sol. Même si elle n'est pas un élément nutritif, l'acidité ou l'alcalinité du sol influence beaucoup la biodisponibilité des éléments nutritifs et la croissance des cultures. Le pH tampon sera aussi utile dans le cas de sols acides pour déterminer les besoins en chaux.

Les principales analyses d'éléments nutritifs pour lesquelles des rapports sont préparés sont le phosphore, le potassium et le magnésium. Cela correspond aux éléments nutritifs, à l'exception de l'azote, les plus souvent épandus comme engrais. Certains laboratoires incluent une analyse du calcium.

L'analyse de l'azote des nitrates est réalisée sur un échantillon de sol différent prélevé à une profondeur plus grande.

Les oligo-éléments ne font pas l'objet d'analyses aussi fréquemment, bien que ces analyses deviennent de plus en plus populaires. Les analyses du zinc et du manganèse sont bien calibrées avec les besoins des cultures et sont effectuées plus régulièrement. Bien que les dosages d'autres oligo-éléments (cuivre, fer, bore) ne sont pas bien calibrés, certains rapports les incluent tout de même.

Les analyses de soufre deviennent plus fréquentes en Ontario puisque les dépôts atmosphériques de soufre découlant de la pollution diminuent, mais elles ne sont pas bien calibrées avec les besoins des cultures.

De plus en plus de laboratoires analysent systématiquement la teneur du sol en matière organique. Cette donnée sert souvent à juger de la qualité du sol et influence aussi les recommandations d'herbicides.

Pour les sols qu'on soupçonne être trop riches en sels, il est possible

de commander une analyse de leur conductivité électrique.

Consultez la page suivante pour de plus amples détails sur ce que comprend un rapport d'analyses du sol typique.

Présentation des résultats

La présentation des résultats des analyses de sol n'est pas uniforme, en particulier si l'on traite avec des laboratoires situés à l'extérieur de l'Ontario. La plupart des laboratoires ontariens expriment les résultats en milligrammes par litre de sol (mg/L), ce qui revient à donner le poids des éléments nutritifs extraits d'un volume donné de sol. Cette façon de présenter l'information s'apparente aux résultats exprimés en milligrammes par kilogramme de sol (mg/kg), une mesure du poids par unité de poids, qui équivaut à des parties par million (ppm).

Certains laboratoires, surtout aux États-Unis, expriment les résultats des analyses de sol en livres de l'élément assimilable par acre, ce qui prête à confusion puisque les résultats ne sont alors pas exprimés en fonction d'une quantité précise. La couche arable sur une superficie d'un acre pèse environ 2 millions de livres. Les résultats peuvent être convertis en parties par million en les divisant par 2. Par exemple, si l'analyse de la teneur en phosphore du sol est de 120 lb/acre, divisez ce chiffre par 2 pour obtenir 60 ppm.

Au Québec, les résultats sont exprimés en kg/ha. Utilisez la formule suivante pour convertir ces résultats en ppm :

$$\text{kg/ha} \times 0,455 = \text{ppm}$$

Il est également important de connaître les agents d'extraction qui sont utilisés pour effectuer l'analyse de sol.

Renseignements contenus dans un rapport d'analyse du sol

Renseignements généraux

- **Numéro de l'échantillon** — Ce numéro est fourni par le producteur relativement aux résultats pour un champ donné.
- **Numéro de laboratoire** — Fourni par le laboratoire, ce numéro permet au laboratoire de faire le suivi de l'échantillon tout au long du processus d'analyse.

Valeurs analysées

- **pH du sol** — Tout rapport d'analyse doit inclure le pH du sol mesuré dans une pâte sol-eau saturée.
- **pH tampon** — Mesure effectuée uniquement pour les sols acides (en général $\text{pH} < 6,0$).
- **Phosphore (ppm)** — En Ontario, les laboratoires accrédités doivent faire ce dosage par la méthode Olsen, qui utilise comme réactif du bicarbonate de sodium. Certains laboratoires incluent aussi les résultats obtenus par les méthodes d'extraction Mehlich ou Bray. Le rapport doit toujours préciser la méthode et les unités utilisées.
- **Potassium, magnésium (calcium, sodium) (ppm)** — Les cations sont mesurés par un processus d'extraction à l'acétate d'ammonium, les résultats étant exprimés en mg par litre de sol ou en ppm. Il arrive que les dosages du calcium et du sodium soient aussi inclus.
- **Azote des nitrates (ppm)** — L'azote des nitrates n'est pas systématiquement dosé lors des analyses de sol, étant donné que l'interprétation des résultats n'est valide que si l'échantillon a été prélevé plus profondément au moment des semis ou avant l'application d'engrais en bandes latérales.
- **Soufre (S) ou sulfate ($\text{SO}_4\text{-S}$) (ppm)** — Cette analyse optionnelle n'a pas été calibrée. Le dosage se fait à partir d'échantillons prélevés plus profondément, comme dans le cas de l'azote des nitrates.
- **Oligo-éléments (ppm)** — Le Mn et le Zn sont les seuls oligo-éléments dont le dosage se fait au moyen d'une analyse reconnue par le MAAARO. Ils apparaissent comme l'indice de manganèse et l'indice de zinc (consultez les « valeurs dérivées » plus bas). Il se peut que le rapport d'analyse fasse état des concentrations d'autres oligo-éléments, mais selon des recherches menées en Ontario, ces concentrations sont peu révélatrices de la biodisponibilité réelle de ces oligo-éléments.
- **Matière organique (%)** — Il s'agit d'une analyse optionnelle. Bien vérifier si le résultat indique la teneur en matière organique ou la teneur en carbone organique.
- **Conductivité électrique (CE) (millisiemens/cm)** — Cette analyse facultative indique si la salinité du sol est excessive.

Valeurs dérivées

- **Indice de zinc et de manganèse** — Ces indices sont calculés à partir des résultats d'analyse et du pH du sol.
- **Capacité d'échange cationique (CEC) et pourcentage de saturation en bases** — Ces données sont calculées à partir du pH du sol et des résultats des analyses pour le K, le Mg et le Ca. Les résultats peuvent être faussés en présence de chaux libre dans des sols à pH élevé. Les recommandations de fertilisation ontarienne ne sont pas influencées par la CEC ni par le taux de saturation en bases.

Recommandations relatives aux éléments nutritifs

- **Recommandations sur l'engrais et la chaux** — Elles n'apparaîtront que si des renseignements sur la culture qui prendra place ont été fournis. Les résultats d'analyse peuvent servir à déterminer les besoins en éléments nutritifs de cultures particulières à partir des tableaux dans les recommandations de production appropriées. Certains laboratoires fourniront les recommandations de l'Ontario si la demande est faite. Les laboratoires fourniront souvent leurs propres recommandations.
- **Rajustements aux recommandations de fertilisation** — Les rajustements pour l'épandage d'engrais ou pour une précédente culture de légumineuses seront inclus dans les recommandations en matière d'engrais si les renseignements ont été fournis.
- **Remarques et avertissements** — Certains rapports incluront des renseignements supplémentaires en fonction de la culture et des données d'analyse du sol.

Remarque : Les cotes attribuées aux valeurs obtenues tiennent compte à la fois du résultat d'analyse et de la culture envisagée.

Agents d'extraction

L'analyse des sols dans le but de déterminer les besoins en engrais est une opération complexe, car il s'agit d'évaluer quelle sera, dans un sol donné, la quantité d'éléments nutritifs qui seront biodisponibles pour un large éventail de cultures tout au long de la saison de croissance. L'exercice serait simple si la distribution des éléments nutritifs dans le sol était uniforme, si tous les éléments nutritifs étaient entièrement assimilables par les végétaux et si le prélèvement des éléments nutritifs se faisait d'une seule façon. Toutefois, le sol est un substrat extrêmement complexe qui est le siège d'une multitude d'interactions physiques, chimiques et biologiques qui ont cours simultanément. Les interactions qui s'opèrent à l'interface sol-racine sont encore plus complexes et encore moins bien connues.

Le phosphore illustre bien cette complexité. Dans le sol, le phosphore prend le plus souvent la forme de phosphate. Dans les sols allant de neutres à alcalins, le phosphate se combine au calcium. Dans les sols allant de neutres à acides, il se combine au fer ou à l'aluminium. Le phosphate réagit également à divers minéraux argileux ou composés organiques pour former des combinaisons complexes et peut être présent dans la fraction organique du sol ou dans sa biomasse. Or, pour mesurer toutes ces formes de phosphore que les végétaux assimilent plus ou moins bien par divers processus, nous disposons d'une seule analyse chimique rapide.

Chaque analyse chimique comporte deux étapes. Il y a d'abord la conversion du composé à analyser en une forme mesurable. Ce matériau est ensuite analysé.

Cependant, parce que nous n'estimons que la portion biodisponible des éléments

nutritifs dans le sol, la première étape diffère d'une analyse chimique normale. Dans le cas des analyses de sol, on traite d'abord le sol à l'aide d'un agent d'extraction, afin d'extraire la fraction de l'élément nutritif qui est biodisponible. C'est cet extrait que l'analyse permet de mesurer.

Choix d'un agent d'extraction

Pour être utile à la détermination des besoins des cultures, l'agent d'extraction doit déboucher sur l'estimation la plus juste possible de la quantité de l'élément nutritif qu'il faudra apporter à la culture pour qu'elle produise un rendement optimal. Comme cette estimation est difficile à faire, l'évaluation des agents d'extraction s'effectue le plus souvent en mesurant la précision de l'agent d'extraction à estimer les éléments nutritifs biodisponibles pour les plantes dans la gamme de sols testés dans le laboratoire ou dans la région. L'agent d'extraction doit être relativement peu coûteux, facile d'emploi, comporter le moins possible de produits chimiques toxiques ou corrosifs et se prêter à des méthodes d'utilisation reproductibles d'un laboratoire à l'autre.

Aucun agent d'extraction n'extrait du sol exactement la fraction de l'élément nutritif qui est assimilable par les végétaux. Chacun comporte ses points forts et ses points faibles en fonction du type de sol. Le choix d'un agent d'extraction doit être guidé par son utilité pour le sol à l'étude et par la disponibilité de données qui permettent d'établir une corrélation avec la réaction des cultures. Se reporter au chapitre 7 pour plus de détails.

Au commencement, l'eau

Le premier agent d'extraction utilisé dans les analyses de sol a été l'eau. L'eau n'extrayait que la fraction de l'élément nutritif présente dans la solution de sol. Même si cette fraction est immédiatement assimilable par les végétaux, elle ne représente qu'une infime partie du total des éléments nutritifs biodisponibles dans le sol. Elle n'est pas bien reliée aux éléments nutritifs en réserve dans le sol, étant donné que cette quantité varie considérablement d'un sol à l'autre.

Ayant constaté que les racines excrètent des acides faibles à leur surface, les chercheurs se sont tournés vers les solutions acides. Depuis, les agents d'extraction n'ont cessé de se multiplier et de se diversifier, au fur et à mesure que les chercheurs ont voulu expérimenter des agents d'extraction plus fiables et plus compatibles pour un vaste éventail de conditions de sols. Ces agents d'extraction portent souvent le nom du chercheur qui les a mis au point ou de l'ingrédient principal de la solution d'extraction.

Variation régionale

L'agent d'extraction choisi varie de région en région, étant donné que l'agent le plus approprié dépend en grande partie des sols qu'on retrouve dans la région.

La première étape pour déterminer un agent d'extraction approprié ou une méthode d'analyse de sol convenable consiste à prélever des échantillons dans une gamme de sol dans la région, puis à faire pousser des végétaux dans chaque sol. Ces végétaux sont récoltés, pesés et analysés afin de trouver la quantité d'éléments nutritifs prélevés par les végétaux dans les différents sols.

Différents agents d'extraction sont utilisés pour prélever les éléments nutritifs des sols, et les extraits sont analysés. L'étape

finale compare les résultats d'analyse des extraits aux quantités assimilées par les plantes, ce qui est la mesure de la capacité du sol à fournir aux végétaux des éléments nutritifs biodisponibles. L'agent d'extraction choisi pour une région est normalement celui qui donne les résultats les plus proches des quantités d'éléments nutritifs assimilées par les végétaux.

On classe généralement les agents d'extraction utilisés pour le dosage du phosphore dans les sols selon qu'il s'agit de solutions acides ou alcalines. Les solutions acides (utilisées dans les méthodes Bray et Mehlich) sont en général utilisées dans les régions où les sols sont acides. Dans les sols alcalins, ces agents d'extraction sous-évaluent les concentrations de phosphore assimilable, du fait que l'acide est en partie neutralisé par la chaux libre présente dans le sol. Voir le tableau 5-1.

Les agents d'extraction alcalins (bicarbonate de sodium, bicarbonate d'ammonium) donnent des résultats plus uniformes dans une vaste gamme de pH du sol. Le potassium, le calcium et le magnésium sont extraits à l'aide d'un autre cation semblable, habituellement l'ammonium, pour les retirer du complexe d'échange cationique. On peut extraire les oligo-éléments du sol à l'aide d'un chélateur ou d'un acide faible.

Tableau 5-1. Corrélation entre le P extractible et le P assimilé dans des conditions contrôlées de serre

Agent d'extraction	Tous les sols ¹ corrélation (r ²) *	pH>7,0 ² corrélation (r ²) *	pH> 6,1-7,0 ³ corrélation (r ²) *	pH>6,1 ⁴ corrélation (r ²) *
Bicarbonate de sodium	0,74	0,79	0,64	0,87
Bicarbonate d'ammonium	0,73	0,71	0,63	0,95
Bray-Kurtz P1	0,54	0,52	0,33	0,73
Bray-Kurtz P2	0,65	0,60	0,40	0,90
Mehlich III	0,66	0,57	0,40	0,93

¹ n = 88 sols

² n = 46 sols

³ n = 30 sols

⁴ n = 12 sols

* Une corrélation r² de 1,00 signifie une correspondance complète.

Source: T.E. Bates, « Prediction of phosphore availability from 88 Ontario soils using five phosphorus soil tests », communication dans *Soil Science Plant Analysis* 21 (1990) : 1009-1023.

Une fois l'agent d'extraction choisi, on effectue des essais en plein champ pour préciser le taux d'application optimal d'engrais en fonction des différentes concentrations d'éléments nutritifs dans le sol et en fonction des différentes cultures. L'établissement de ces données propres à chaque agent d'extraction coûte cher. Les laboratoires d'analyse de sol sont réticents à changer d'agent d'extraction, à moins qu'il n'y ait un avantage réel à le faire.

Caractère non interchangeable des résultats obtenus avec des agents d'extraction différents

Les concentrations obtenues pour un même sol peuvent varier considérablement selon l'agent d'extraction utilisé. Ainsi, le dosage du phosphore à l'aide d'une solution de bicarbonate de sodium peut donner un résultat la moitié moins grand, ou plus petit encore, que celui qu'on obtient au moyen d'un agent d'extraction Bray P1. Toutefois, dans des conditions convenables, les deux peuvent fournir un indice de la biodisponibilité du phosphore. Les difficultés surgissent si l'on utilise les données de l'une de ces analyses avec les tableaux de recommandations de fertilisation élaborés pour l'autre analyse.

Les résultats obtenus par différents agents d'extraction ne sont pas parfaitement comparables les uns aux autres. Même si, règle générale, l'augmentation de la concentration d'un agent d'extraction augmente les autres augmenteront aussi, il existe des exceptions. Même lorsque les agents d'extraction augmentent systématiquement, la relation entre les agents d'extraction est souvent différente à de faibles concentrations qu'à des concentrations plus élevées. Pour cette raison, il faut éviter de convertir les valeurs obtenues avec différents agents d'extraction. Il faut savoir quel agent d'extraction a été utilisé et se reporter aux tableaux de recommandations de fertilisation élaborés pour cet agent d'extraction.

Contrôle de la qualité

Comme pour tout procédé chimique, un contrôle de la qualité est nécessaire pour garantir la précision des résultats obtenus par les laboratoires. En Ontario, un programme d'accréditation administré par le ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario est utilisé à cette fin. Les détails du programme évoluent au fil du temps, mais les principes fondamentaux demeurent les mêmes.

Objectifs d'un programme d'accréditation des laboratoires

Les objectifs d'un programme d'accréditation des laboratoires sont les suivants :

- veiller à ce que les laboratoires participants réalisent des analyses qui tombent dans la fourchette de résultats attendus du programme d'accréditation;
- assurer l'uniformité des résultats obtenus par les laboratoires accrédités;
- encourager l'utilisation, dans les analyses de sol, des agents d'extraction (consultez le tableau 5-2) pour lesquels il existe amplement de données sur les réactions des cultures à différents dosages dans les sols de l'Ontario;
- promouvoir le recours aux laboratoires accrédités;
- promouvoir le respect des recommandations de fertilisation qui s'appuient sur la recherche effectuée en Ontario.

Les laboratoires accrédités respectent un programme de contrôle de la qualité qui garantit les meilleurs résultats. Pour s'assurer que les résultats d'analyse sont cohérents, un laboratoire doit toujours inclure un ou deux échantillons de sol étalon dans chaque série d'analyses. Les solutions étalons sont préparées soigneusement et utilisées pour calibrer les instruments et pour vérifier leur calibrage périodiquement. La tenue de registres et le suivi servent à régler les problèmes et à s'assurer du rendement du laboratoire au fil du temps.

Un programme d'évaluation externe offre une vérification supplémentaire du système. Cela permet de comparer les laboratoires entre eux tout en aidant à cerner les problèmes qui ont été négligés par le contrôle interne de la qualité du laboratoire.

Tableau 5-2. Méthodes d'analyse du sol agréées en Ontario

Analyse	Méthode
pH du sol	pâte saturée
besoins en chaux	pH tampon SMP
phosphore	bicarbonate de sodium (Olsen)
potassium, magnésium	acétate d'ammonium
indice de zinc	solution DTPA, corrigée en fonction du pH du sol
indice de manganèse	acide phosphorique, corrigé en fonction du pH du sol
nitrate du sol	extraction au chlorure de potassium

Historique de l'accréditation des analyses de sol en Ontario

En 1989, il a été proposé qu'au lieu que le MAAARO reconnaisse un seul laboratoire pour effectuer des analyses de sols, d'aliments pour animaux, de tissus végétaux et des substrats destinés à la culture en serre, tous les laboratoires pouvant démontrer leur compétence en matière d'analyses de ces substrats seraient reconnus. C'est ainsi que 33 laboratoires ont demandé l'accréditation.

Le personnel du ministère a visité chacun des laboratoires et leur a communiqué les méthodes d'analyse des sols reconnues par le Comité ontarien de la recherche et des services en gestion des sols. Le personnel a aussi dressé une liste du matériel d'analyse et des méthodes de contrôle de la qualité et de suivi du laboratoire. Les laboratoires devaient analyser trois exemplaires d'un certain nombre d'échantillons de sol et devaient respecter des normes quant à la précision des résultats.

Pour recevoir l'accréditation, les laboratoires devaient prouver leur compétence dans les analyses suivantes : pH, pH tampon, phosphore, magnésium et potassium. Il leur était possible d'obtenir également l'accréditation facultative pour les indices de zinc et de manganèse.

En 1989, trois laboratoires ont reçu l'accréditation. En 1991, une nouvelle campagne d'accréditation a eu lieu; les laboratoires devaient cette fois analyser un jeu de cinq échantillons de sols différents, chaque jeu étant sélectionné séparément. En 1998, l'Ontario a adhéré au programme North American Proficiency Testing Program (NAPT). Même si cette adhésion fait en sorte que les échantillons fournis par le programme proviennent de sols qui ne sont pas représentatifs des sols de l'Ontario, elle facilite quand même le travail de vérification et assure une plus grande uniformité entre les laboratoires. Les échanges d'échantillons sont réalisés quatre fois par année, chaque échange comportant cinq sols que le laboratoire doit analyser trois fois en trois jours. Pour conserver leur accréditation, les laboratoires sont tenus de maintenir un niveau de précision acceptable pour chacune des méthodes d'analyse reconnues.

D'autres laboratoires peuvent être accrédités pourvu qu'ils démontrent une précision acceptable lors de l'analyse des séries d'échantillons ainsi que des échantillons fournis dans le cadre du programme d'échange NAPT. En 2005, on comptait six laboratoires accrédités en Ontario, alors que ce nombre était de huit à l'échelle de la province en 2018.

pH du sol

Le pH du sol est la mesure de l'activité ou de la concentration d'ions hydrogène dans la solution de sol. Cette activité influence la biodisponibilité de la plupart des éléments nutritifs et régit ou conditionne la plupart des processus biologiques.

La concentration des ions hydrogène se mesure avec une électrode indicatrice de pH. Au cœur de cette électrode se trouve une membrane de verre sensible uniquement aux ions hydrogène. Pendant que les ions positifs pénètrent dans l'électrode, un courant est appliqué puis mesuré avec un appareil qui n'est ni plus ni moins qu'un voltmètre. La lecture de la tension en volts de plusieurs étalons est prise, ce qui permet d'obtenir un graphique. Les lectures de la tension

en volts des échantillons sont ensuite comparées au graphique et des valeurs de pH leur sont attribuées.

Il n'existe pas, pour la mesure du pH, de ratio sol-eau idéal qui fasse l'unanimité. Habituellement, le pH du sol se mesure à l'aide d'une eau désionisée pour former une pâte saturée ou un ratio sol-eau de 1:1 ou 1:2. La pâte saturée est la méthode accréditée en Ontario et les recommandations relatives à la chaux sont basées sur cette méthode. Le pH mesuré tend à augmenter avec l'augmentation de la quantité d'eau ajoutée au sol. La différence la plus grande est observée dans les sols ayant un faible pouvoir tampon, c.-à-d. dans les sables grossiers.

Suivant d'autres méthodes, on utilise des solutions de chlorure de calcium pour préparer une pâte ou une boue, ce qui atténue l'interférence provenant de fortes concentrations de sel. Cette méthode tend à donner une lecture de pH inférieure à celle qu'on obtient avec une boue contenant de l'eau pure.

La pâte saturée est préparée en ajoutant tout juste assez d'eau à l'échantillon de sol pour le saturer totalement sans qu'il reste d'eau non absorbée. La préparation d'une bonne pâte saturée est une tâche longue et difficile, qui donne néanmoins une approximation plus juste du pH à l'interface racine-sol que les boues plus diluées.

Le « p » minuscule dans pH

En mathématiques, le « p » signifie « logarithme négatif de... » d'une valeur donnée. Dans le du pH, il s'agit du logarithme négatif de la concentration d'ions hydrogène (H) dans la solution.

L'eau pure renferme certaines molécules qui se sont décomposées en ions individuels, notamment en ions hydrogène (H⁺) ou en ions hydroxyle (OH⁻). Eau (H₂O) = H⁺ + OH⁻

L'eau pure renferme un nombre égal d'ions hydrogène et d'ions hydroxyle, et possède un pH neutre (consultez la figure 3-1). Si vous comptiez le nombre d'ions H⁺ dans l'eau pure, vous trouveriez **1/10 000 000 moles d'ions H⁺ par litre d'eau.**

En notation scientifique, cela donne 10⁻⁷ ions H⁺; le logarithme négatif de ce nombre est la valeur positive du petit nombre en exposant, soit 7. À mesure qu'augmente la concentration d'ions hydrogène, la valeur du pH diminue et la solution s'acidifie.

Comme l'échelle de pH est logarithmique, un pH de 6 est 10 fois plus acide qu'un pH de 7.

Un pH de 5 est 10 fois plus acide qu'un pH de 6 et 100 fois plus acide qu'un pH de 7.

pH tampon

Méthode de Shoemaker, McLean et Pratt (SMP)

La mesure du pH du sol sert à déterminer s'il faut chauler le champ. Selon la culture, des sols avec un pH inférieur à 6,1 doivent être chaulés, et une mesure du pH tampon est réalisée pour déterminer la quantité de chaux exigée.

Le pH tampon (pouvoir tampon) du sol s'entend de la capacité de ce sol à résister aux fluctuations du pH. Dans un sol acide, cette capacité est due à une acidité de réserve. Cette acidité de réserve est causée par l'hydrogène, l'aluminium et les autres cations qui sont retenus dans le complexe d'échange cationique. Plus l'acidité de réserve est élevée, plus il faut de chaux pour ramener le pH dans une fourchette optimale.

Cette acidité de réserve se mesure en ajoutant une solution tampon (SMP) à l'échantillon de sol et en procédant à la lecture du pH du sol et du mélange tampon après une demi-heure. Ce mélange tampon résiste aux changements de pH à partir de 7,5, mais l'acidité du sol réduit le pH du tampon proportionnellement à la quantité d'acidité de réserve dans le sol. Si le pH de ce mélange tampon est faible, le sol a une forte acidité de réserve et il faudra beaucoup de chaux pour le neutraliser.

Les besoins en chaux se calculent à l'aide des formules fournies dans le tableau 5-3.

Tableau 5–3. Calcul des besoins en chaux

pH auquel le sol est chaulé	Équation
7,0	chaux (t/ha)* = $334,5 - 90,79 \text{ pH}_B^{**} + 6,19 \text{ pH}_B^2$
6,5	chaux (t/ha) = $291,6 - 80,99 \text{ pH}_B + 5,64 \text{ pH}_B^2$
6,0	chaux (t/ha) = $255,4 - 73,15 \text{ pH}_B + 5,26 \text{ pH}_B^2$
5,5	chaux (t/ha) = $37,7 - 5,75 \text{ pH}_B$

* Les besoins en chaux sont calculés en tonnes de chaux par hectare, en fonction d'une chaux ayant un indice agricole de 75 (consultez le tableau 3–2 du chapitre 3 pour de plus amples détails).

**($\text{pH}_B = \text{pH tampon}$)

Exemple de calcul. Déterminer le besoin en chaux d'un sol dont le pH tampon (pH_B) est de 6,5 afin de parvenir à un pH désiré de 7,0 :

$$334,5 - (90,79 \times 6,5) + 6,19 \times (6,5)^2 = 5,9 \text{ t/ha de chaux sont nécessaires}$$

Sels solubles

Les sels solubles dans les sols peuvent découler de l'application excessive ou de déversements d'engrais et de fumiers, du ruissellement des sels épandus sur les routes et de déversements chimiques. On peut aussi retrouver de fortes concentrations de sels dans des zones soumises à des suintements ou à des déversements de saumure causés par une exploration pétrolière ou gazière récente ou passée. La présence de fortes concentrations de sels solubles à l'intérieur ou à proximité d'une bande fertilisée peut compromettre sévèrement la croissance des végétaux (racines), sans influencer pour la peine les concentrations salines dans le reste du sol. Il est difficile de discerner l'excès de salinité dans une bande d'engrais de démarrage parce que le volume de sol touché est faible et que l'excès de salinité peut se dissiper rapidement dans les sols environnants, sous l'effet de la pluie.

Les sels solubles nuisent aussi à l'absorption d'eau par les végétaux. En présence d'une quantité de sels donnée dans un sol, la concentration de sels dans l'eau du sol sera d'autant plus grande que le sol renfermera peu d'eau. La croissance des végétaux est surtout compromise par la présence de sels solubles quand les réserves d'eau sont faibles, comme durant les périodes de sécheresse, et

dans les sols, comme les sols sableux et graveleux, qui ont une faible capacité de rétention d'eau.

On mesure les concentrations de sels solubles en laboratoire d'après la conductivité électrique d'une boue sol-eau. Plus le sol renferme de sels solubles, plus la conductivité électrique est élevée. Le tableau 5–4 permet d'interpréter les valeurs de conductivité électrique des sols pour des sols cultivés de l'Ontario, en fonction de ratios eau-sol de 2:1. Cette boue est préparée en mélangeant un volume de sol séché à l'air avec deux volumes d'eau.

Pour les sols servant à la serriculture, les analyses de sol reconnues par le MAAARO utilisent un échantillon de sol plus volumineux et effectuent la lecture de la conductivité électrique sur un extrait à saturation.

Tableau 5-4. Interprétation des lectures de conductivité électrique du sol

Conductivité électrique (millisiemens/cm)	Cote	Réaction des végétaux
de 0 à 0,25	L	convient à la plupart si des quantités recommandées d'engrais sont utilisées
de 0,26 à 0,45	M	convient à la plupart si des quantités recommandées d'engrais sont utilisées
de 0,46 à 0,70	H	peut réduire l'émergence de végétaux sensibles au sel et causer des dommages légers à sévères à ce type de plantes
de 0,71 à 1,00	E	peut prévenir l'émergence de la plupart des végétaux et leur causer des dommages allant de légers à sévères
1,00	E	devrait causer de graves dommages à la plupart des végétaux

Dosage de l'azote des nitrates

La teneur en azote des nitrates du sol lors de la plantation peut servir à adapter les épandages d'engrais azotés pour le maïs ou l'orge de printemps ou pour les épandages d'azote pour le maïs lors de l'épandage en bandes (test préalable à l'épandage d'azote en bandes latérales ou PSNT). Peu de travaux ont été consacrés en Ontario au dosage de l'azote pour d'autres cultures, comme le blé, le canola ou la plupart des cultures horticoles. Des travaux ont porté sur les cultures de la pomme de terre et de la tomate, mais les résultats n'ont pas débouché sur des recommandations définitives.

L'analyse routinière de l'azote n'est pas faite sur les échantillons de sol parce que la teneur en nitrates varie beaucoup d'une semaine à l'autre. Il faut prélever plus profondément les échantillons destinés au dosage de l'azote des nitrates, et il faut les manipuler avec soin pour éviter que les concentrations de nitrates dans le sol ne se modifient.

Certains utilisateurs demandent une analyse pour l'azote ammoniacal ainsi que pour les nitrates, même si ces types d'azote ne font l'objet d'aucune recommandation. On utilise alors la même méthode d'extraction, mais en soumettant l'extrait à une procédure analytique différente. Si l'échantillon est analysé pour le dosage d'ammonium,

il doit être réfrigéré. Le séchage de l'échantillon invalidera le dosage d'azote ammoniacal (consultez la partie *Prélèvement d'échantillons* du chapitre 4).

Méthodes

L'azote des nitrates présent dans le sol se trouve presque exclusivement à l'intérieur de la solution de sol et peut facilement s'extraire. L'agent d'extraction normalement utilisé est une solution de chlorure de potassium.

On mélange un échantillon de sol à une solution de chlorure de potassium dans une proportion d'une partie de sol pour cinq parties de solution d'extraction, puis on agite le mélange pendant une demi-heure avant de le filtrer. L'extrait est analysé dans un analyseur automatique, qui mesure l'intensité de coloration produite après le mélange de l'extrait avec certains produits chimiques.

Des sondes de champ portatives sont désormais disponibles commercialement. Leur fonctionnement et leur calibrage attentifs par l'utilisateur doivent être totalement compris. Ces sondes fournissent une analyse sur place rapide et réduisent les coûts liés à l'envoi d'échantillons à des laboratoires commerciaux. Il est conseillé de participer à un programme de vérification des échantillons afin de vérifier le rendement du matériel et les résultats.

Commentaires

- Cette méthode donne des résultats hautement reproductibles et est relativement facile à suivre.
- Les valeurs du nitrate dans le sol augmentent généralement de 30 % du début mai (moment des présemis) au début juin (préalablement à l'épandage en bandes). Assurez-vous que le laboratoire d'analyse de sol a connaissance du moment de votre échantillonnage.
- La variabilité de la teneur du sol en nitrates dans un champ vient compliquer l'interprétation du dosage de l'azote des nitrates.
- La teneur en nitrates du sol risque de sous-estimer la quantité d'azote assimilable dans les sols où des apports d'azote de sources organiques (par exemple, du fumier de bétail, des boues d'épuration, l'enfouissement de légumineuses) ont été épandus et n'ont pas eu la chance de se minéraliser. Des recherches en cours visent à élaborer des analyses de sols qui permettraient de doser l'azote facilement minéralisable dans le sol et la matière organique dont le sol est enrichi.

Phosphore

Les trois méthodes courantes d'extraction du phosphore assimilable sont les méthodes Olsen (bicarbonate de sodium), Bray P1 et Mehlich III (consultez le tableau 5–5).

Quelle que soit la méthodologie utilisée, l'étape suivante consiste à déterminer la concentration de phosphore dans l'extrait. Plusieurs méthodes d'analyse peuvent être utilisées, dont certaines sont liées à un agent d'extraction particulier. La plus fréquente consiste à ajouter du molybdène à un révélateur. Cet élément provoque une coloration bleue en combinaison avec le phosphore. Plus la concentration de phosphore est grande, plus la coloration est intense.

L'agent d'extraction utilisé avec la méthode Olsen est très alcalin et tend donc à donner des colorations différentes de celles qu'on obtient avec les méthodes Bray ou Mehlich. De plus, les extraits Bray ou Mehlich tendent à donner des concentrations de phosphore supérieures à celles que donne la méthode Olsen, de sorte que les étalons utilisés dans l'analyse sont différents.

Tableau 5–5. Agents d'extraction du phosphore

Méthode	Solution d'extraction	pH de la solution	Endroits où la méthode est utilisée
bicarbonate de sodium	0,5 M de solution NaHCO_3 , 1 partie de sol dans 20 parties de solution, agitation pendant 30 min à la température de la pièce	8,5	Ontario, Iowa, la plupart des États de l'Ouest
Bray P1 (Bray faible)	0,025 M HCl + 0,03 M NH_4F , 1 partie de sol pour 10 parties de solution; agitation pendant 5 min	2,5	Michigan, Ohio, Indiana, Illinois, États de l'Est
Bray P2 (Bray forte)	0,1 M HCl + 0,03 M NH_4F , 1 partie de sol pour 10 parties de solution; agitation pendant 5 min	2,5	au début des années 1960 en Ontario, avant le bicarbonate de sodium
Mehlich III	0,2 M CH_3COOH + 0,25 M NH_4NO_3 + 0,015 M NH_4F + 0,013 M HNO_3 + 0,001 M EDTA, 1 partie de sol pour 10 parties de solution	2,5	Québec, provinces atlantiques, Pennsylvanie, États du Sud-Est

Méthode au bicarbonate de sodium (Olsen)

La méthode recommandée en Ontario est la méthode au bicarbonate de sodium (qu'on appelle aussi méthode Olsen).

Comme la solution d'extraction a un pH de 8,5, elle convient le mieux aux sols ayant un pH entre 6,0 et 8,0. Le bicarbonate de sodium dissout les phosphates de calcium présents dans le sol et certains phosphates organiques. La méthode au bicarbonate de sodium permet de prévoir la teneur relative en phosphore assimilable d'une vaste gamme de types de sols.

Commentaires

- La méthode au bicarbonate de sodium oblige à agiter la solution pendant plus longtemps que les méthodes Mehlich ou Bray (soit pendant 30 minutes au lieu de 5).
- La méthode au bicarbonate de sodium est très sensible à la température, au pH et au temps d'agitation, et des conditions uniformes sont donc requises tout au long de l'analyse afin de garantir des résultats cohérents. Olsen a conclu que le phosphore extractible peut augmenter de presque 0,5 ppm pour une hausse de température de 1 °C de la solution d'extraction entre 20 °C et 30 °C.

Bray P1

La solution d'extraction Bray contient de l'acide chlorhydrique et du fluorure d'ammonium, qui forment une solution acide. Elle tend à simuler un environnement de sol acide. Cette solution d'extraction convient davantage aux sols acides qu'aux sols alcalins.

La solution d'extraction Bray a tendance à extraire davantage de phosphore que la méthode au bicarbonate de sodium. En présence d'un pH élevé, la nature acide de la solution d'extraction peut dissoudre les phosphates de calcium, ce qui surestime le phosphore biodisponible. Par ailleurs, la présence de chaux libre dans le sol risque de neutraliser l'acidité de la solution d'extraction et de la rendre ainsi moins efficace. Du fait de ces deux situations, la solution d'extraction Bray P1 donne des résultats imprévisibles dans des conditions alcalines.

Un agent d'extraction Bray P2 modifié (Bray fort) a été utilisé en Ontario au cours des années 1960, utilisant un acide plus concentré pour surmonter l'effet neutralisant des sols alcalins. Il a été remplacé par du bicarbonate de sodium, qui était plus constant avec la gamme de sols présente en Ontario.

Mehlich III

La solution Mehlich III est une solution d'extraction composée de multiples éléments, dont l'acide acétique, le fluorure d'ammonium, le nitrate d'ammonium et un chélateur, l'acide éthylènediaminetétracétique (EDTA). Elle combine les produits chimiques des solutions d'extraction Bray P1, à l'acétate d'ammonium et au DTPA.

La préparation Mehlich III extrait le phosphore avec l'acide acétique et le fluorure d'ammonium. Elle extrait le potassium, le magnésium, le sodium et le calcium avec le nitrate d'ammonium et l'acide nitrique, et extrait le zinc, le manganèse, le fer et le cuivre avec l'EDTA.

Cette méthode est souvent retenue parce qu'elle accélère l'analyse. Lorsqu'elle est utilisée avec un appareil d'émission au plasma inductif capable d'analyser plusieurs éléments simultanément, cette méthode est attrayante pour les laboratoires d'analyse de sol. Sans qu'on sache trop pourquoi, le dosage obtenu par émission au plasma inductif peut être différent de celui qu'on obtient par colorimétrie. Il faut considérer qu'il s'agit de deux analyses distinctes et interpréter les résultats séparément avant de faire des recommandations de fertilisation.

Puisqu'elle est acide, la solution Mehlich III est celle qui convient le mieux aux sols acides, de sorte qu'elle est couramment utilisée au Québec et dans les provinces atlantiques. La concentration acide relativement élevée de cet agent d'extraction signifie qu'il donnera des résultats adéquats sur des sols légèrement alcalins, mais incohérents sur des sols avec une teneur élevée en carbonate (chaux libre).

Potassium, calcium, magnésium, sodium

Le potassium, le magnésium, le calcium et le sodium sont chargés positivement. Ce sont tous des cations. Ils peuvent tous être extraits par la même solution, puisque le mécanisme consiste à inonder le sol avec un autre cation pour les déplacer du complexe d'échange.

Puisque le potassium et le magnésium sont les cations qui limitent le plus souvent la croissance des végétaux, on les mesure systématiquement en Ontario. À part l'azote, le potassium est l'élément qui est le plus prélevé par les végétaux.

Comme les concentrations de calcium sont généralement suffisantes dans les sols où le pH est propice à la croissance des végétaux, les laboratoires ne font pas tous le dosage de cet élément. Les concentrations de calcium sont même souvent tellement grandes qu'elles obligent les laboratoires à procéder à des dilutions supplémentaires des extraits de manière à ramener les teneurs en calcium dans les fourchettes de fonctionnement du matériel de laboratoire, ce qui rend le dosage plus long et plus laborieux.

Le sodium n'est pas un élément nutritif indispensable aux cultures. Son dosage n'est réalisé que lorsqu'on soupçonne une contamination environnementale.

La présence de chaux libre dans les sols calcaires complique les dosages du calcium et du magnésium. La chaux libre étant en partie dissoute par la solution d'acétate d'ammonium, les résultats d'analyse surestiment les concentrations de calcium et de magnésium dans l'extrait. La quantité de chaux dissoute dépend du pH de la solution d'extraction et du ratio du sol par rapport à la solution d'extraction, d'où l'importance pour les laboratoires de suivre à la lettre les procédures d'analyse.

Acétate d'ammonium

L'ammonium provenant de l'acétate d'ammonium est le cation le plus souvent utilisé pour extraire les cations du sol.

La biodisponibilité du potassium est influencée par la température de séchage du sol. À des températures supérieures à 35 °C, le potassium a tendance à se lier aux sites d'échange cationique. C'est la raison pour laquelle les laboratoires laissent sécher les échantillons pendant au moins deux jours. L'accélération du processus laisserait de l'eau dans le sol, ce qui aurait un effet sur la concentration finale d'éléments nutritifs,

ou surchaufferait le sol, ce qui rendrait les lectures du potassium inexactes.

La mesure des cations présents dans l'acétate d'ammonium est faite après l'extraction.

Mehlich III

L'agent d'extraction Mehlich III peut s'utiliser pour le potassium et d'autres cations. Les ions ammonium provenant du nitrate d'ammonium et du fluorure d'ammonium se comportent de la même façon que l'ammonium provenant de l'acétate d'ammonium, en délogeant les cations des sites d'échange. Il est ensuite possible de mesurer la concentration de cations dans l'extrait.

La méthode Mehlich III permet d'extraire du sol des quantités de potassium comparables à celles qu'on extrait par la méthode à l'acétate d'ammonium.

Soufre

Il n'y a aucune norme acceptée pour le dosage de soufre ni de recommandations calibrées pour l'épandage d'engrais soufrés en Ontario. Par le passé, les laboratoires d'analyse de sol de l'Ontario n'analysaient pas le soufre sur une base routinière. La concentration de soufre dans le sol est affectée par le lessivage et la minéralisation, ce qui rend difficile la corrélation des résultats d'analyse du sol avec l'assimilation par les plantes. Les dosages du soufre sont vraisemblablement plus significatifs quand l'échantillon est prélevé à 30 cm dans le sol plutôt qu'à 15 cm.

Les laboratoires font l'analyse du soufre sur demande. La technique la plus courante consiste à extraire le soufre du sol à l'aide d'une solution de phosphate de calcium. On mesure la quantité de sulfate dans l'extrait en ajoutant d'abord du baryum qui forme des cristaux de sulfate de baryum, puis en mesurant

la turbidité de la suspension obtenue ou en réduisant le sulfate en sulfure et en mesurant celui-ci par colorimétrie. D'autres laboratoires peuvent analyser le sulfate de soufre dans l'extrait de phosphate de calcium ou dans un extrait Mehlich III à l'aide d'un ICP.

Oligo-éléments

Puisque les oligo-éléments se trouvent généralement en concentrations extrêmement faibles dans le sol, les estimations de leurs concentrations sont habituellement moins fiables que la mesure des macro-éléments.

Les analyses d'oligo-éléments sont difficiles à corréler avec l'assimilation par les plantes pour les raisons suivantes :

- les concentrations dans les solutions d'extraction peuvent être près de la limite de détection du matériel;
- un risque de contamination de l'échantillon par les tubes et les seaux d'échantillonnage ou la poussière existe;
- le pH du sol, la teneur en matière organique et en argile ainsi que la minéralogie peuvent avoir un effet sur l'extraction et l'assimilation des oligo-éléments par les végétaux.

En Ontario, il existe des analyses de sol reconnues pour les dosages du zinc et du manganèse. Dans le cas des autres oligo-éléments, le lien entre dosage et biodisponibilité n'est pas suffisamment précis pour donner lieu à des recommandations de fertilisation. Privilégier l'analyse tissulaire pour diagnostiquer les carences en ces éléments nutritifs. Les analyses de sol peuvent toutefois être utiles, comme outil secondaire.

Extraction des oligo-éléments

Pour la plupart, les oligo-éléments sont actifs chimiquement et forment normalement des composés insolubles avec un agent d'extraction, ce qui les rend difficiles à mesurer. Les chimistes contournent cette difficulté en utilisant des chélateurs ou des acides faibles pour extraire les oligo-éléments. Les chélateurs sont des composés organiques qui « complexifient » les ions métalliques, se liant à l'ion à plus d'un point et les enrobant. Cette réaction maintient les ions dans la solution, ce qui permet de les séparer du sol pour les mesurer.

Les chélateurs les plus courants sont le DTPA (acide diéthylène triamine penta-acétique) et l'EDTA (acide éthylènediaminetétracétique). Même si les deux ont un comportement analogue, leurs affinités sont légèrement différentes en ce qui a trait à divers ions métalliques.

En faisant varier le pH, on peut utiliser les chélateurs pour extraire certains éléments nutritifs spécifiques. Le DTPA est réglé à un pH de 7,3 pour l'extraction de la plupart des éléments nutritifs du sol. On ajoute de la triéthanolamine à la solution d'extraction comme tampon contre les changements de pH au cours de l'extraction. On lui ajoute également du chlorure de calcium pour empêcher la dissolution du carbonate de calcium dans les sols calcaires.

Zinc

Extraction au DTPA

Pour cette extraction, on mélange le sol avec une solution à 0,005 M de DTPA dans une proportion d'une partie de sol pour deux parties de solution, et on agite le mélange durant une heure. Le zinc présent dans le sol est complexifié par le DTPA et maintenu dans la solution.

Après extraction et filtrage, on mesure la teneur en zinc de l'extrait.

Commentaires

- Le processus d'extraction n'atteint pas l'équilibre, de sorte qu'il faut respecter à la lettre les procédures concernant le temps d'agitation, la vitesse et le filtrage afin que les analyses soient cohérentes.
- Puisque le ratio sol-solution est élevé (1:2), il est difficile de filtrer des échantillons de taille adéquate. La filtration peut prendre plusieurs heures ou même toute une nuit.
- La longue durée de l'agitation et de la filtration fait de l'extraction au DTPA l'un des processus les plus longs d'un laboratoire.
- Cette analyse est susceptible d'être contaminée durant le processus d'échantillonnage du sol. Dans les champs, veiller à n'utiliser que du matériel de plastique ou d'acier inoxydable. L'usage d'accessoires galvanisés ou de fer contaminera l'échantillon au zinc ou au fer.

Indice de biodisponibilité du zinc

La biodisponibilité du zinc dépend davantage du pH du sol que de la quantité d'éléments nutritifs présents. Les laboratoires d'analyse de sol de l'Ontario expriment les résultats d'analyse pour le zinc en fonction d'un indice de biodisponibilité du zinc plutôt que par un dosage à proprement parler, ou en plus de ce dosage.

Voici la formule permettant de calculer l'indice de zinc :

Indice de zinc = $203 + (4,5 \times \text{zinc extractible au DTPA en mg/L de sol}) - (50,7 \times \text{pH du sol}) + (3,33) \times (\text{pH du sol})^2$

Interprétation de l'indice

- Supérieur à 200 — contamination possible de l'échantillon ou du champ
- De 25 à 200 — suffisant pour la plupart des grandes cultures
- De 15 à 25 — suffisant pour la plupart des grandes cultures, mais frôlant la carence pour le maïs
- Moins de 15 — carence vraisemblable pour le maïs, et un engrais de zinc devrait être épandu

Extraction à l'aide de la solution Mehlich III

L'EDTA dans l'agent d'extraction Mehlich se comporte d'une façon très analogue au DTPA. Toutefois, comme la méthode Mehlich est moins utilisée en Ontario, il faut se montrer prudent dans l'interprétation des résultats qu'elle donne.

Manganèse

Extraction à l'acide phosphorique

En Ontario, on utilise comme solution d'extraction une solution faible d'acide phosphorique avec un ratio sol-eau de 1:10. Ailleurs, le DTPA est parfois utilisé comme agent d'extraction, mais la méthode à l'acide phosphorique donne des résultats plus uniformes en Ontario.

Commentaires

- L'acide phosphorique permet d'extraire le manganèse du sol beaucoup plus rapidement que l'EDTA.
- La biodisponibilité du manganèse est aussi influencée par le pH du sol.
- Le ratio sol-solution d'extraction est beaucoup plus faible qu'avec la méthode DTPA, de sorte que les échantillons sont filtrés rapidement.

Indice de biodisponibilité du manganèse

La biodisponibilité du manganèse est influencée bien plus par le pH du sol que par la teneur du sol en manganèse. Les laboratoires d'analyse de sol de l'Ontario expriment les résultats d'analyse pour le manganèse en fonction d'un indice de biodisponibilité de cet élément plutôt que par un dosage à proprement parler, ou en plus de ce dosage.

Les valeurs sont les indices de la biodisponibilité du manganèse en fonction du manganèse dans le sol extractible à l'acide phosphorique et du pH du sol.

Lorsque le pH du sol est inférieur ou égal à 7,1 :

Indice de Mn = $498 + (0,248 \times \text{Mn extractible à l'acide phosphorique en mg/L de sol}) - (137 \times \text{pH du sol}) + (9,64) \times (\text{pH du sol})^2$

Lorsque le pH du sol est supérieur à 7,1 :

Indice de Mn = $11,25 + (0,248 \times \text{Mn extractible à l'acide phosphorique en mg/L})$

Interprétation de l'indice

- Supérieur à 30 — suffisant pour les grandes cultures
- De 15 à 30 — suffisant pour la plupart des grandes cultures, mais frôlant la carence pour l'avoine, l'orge, le blé et le soya
- Moins de 15 — vraisemblablement insuffisant pour l'avoine, l'orge, le blé et le soya

Fer et cuivre

Il n'existe en Ontario aucun test permettant d'établir une corrélation valable entre les concentrations de fer ou de cuivre dans le sol et l'assimilation de ces éléments par les cultures ou la réaction des cultures à un apport de ces éléments. En Ontario, une carence en cuivre peut être observée dans des terres noires, mais rarement dans des terres minérales. Il n'y a aucun cas confirmé de carence en cuivre en Ontario.

L'analyse des tissus végétaux est un indicateur beaucoup plus fiable de la biodisponibilité de ces éléments nutritifs.

Bore

Aucun test n'est reconnu en Ontario pour le dosage du bore. Pour se faire une idée approximative de la biodisponibilité de cet élément, on peut l'extraire à l'eau chaude, puis provoquer la floculation du sol à l'aide de chlorure de baryum. La teneur en bore de la solution d'extraction sera donnée par colorimétrie ou par un spectromètre d'émission au plasma inductif.

Les concentrations de bore étant souvent inférieures à 1 ppm, il est beaucoup plus difficile d'obtenir un résultat précis pour le bore que pour d'autres éléments nutritifs présents dans le sol. De plus, l'ion bore est mobile dans le sol, de sorte que les concentrations fluctuent avec le lessivage et la minéralisation.

L'analyse des tissus végétaux est un indicateur beaucoup plus fiable de la biodisponibilité du bore qu'une analyse de sol.

Matière organique

Bien que la teneur des sols en matière organique n'influence pas les recommandations de fertilisation en Ontario, elle joue quand même un rôle important dans la fertilité des sols.

La matière organique contribue à la capacité d'échange cationique d'un sol et améliore sa capacité à retenir les éléments nutritifs biodisponibles. Par l'action microbienne, bien des éléments nutritifs réalisent par ailleurs un cycle qui les amène à prendre des formes organique et minérale, de telle sorte que la matière organique est un réservoir d'éléments nutritifs assimilables lentement. Une concentration suffisante de matière organique est indispensable pour que le sol soit meuble et qu'il puisse retenir l'eau. La matière organique est également importante pour l'efficacité de plusieurs herbicides.

La détermination de la teneur du sol en matière organique est d'autant plus importante maintenant qu'il nous faut comprendre les mécanismes du carbone du sol relativement aux émissions ou à la séquestration de gaz à effet de serre. La gestion du sol peut influencer le déplacement net du carbone dans le sol ou hors du sol, ce qui offre aux agriculteurs des occasions de participer aux programmes d'échange de crédits de carbone. L'évaluation de l'efficacité de ces programmes nécessitera des mesures précises des changements dans la teneur du sol en matière organique.

Il y a deux façons de mesurer les concentrations de matière organique dans le sol :

- La première consiste à mesurer la quantité de carbone organique dans le sol par la chimie humide ou par l'analyse des gaz, et à multiplier le poids obtenu par un facteur afin de le convertir en matière organique.

- La deuxième méthode est une mesure directe du poids de la matière organique perdue quand le sol est brûlé, ce qu'on appelle la perte par calcination.

La détermination de la matière organique par dosage du carbone organique est plus précise que la méthode de la perte par calcination dans les sols pauvres en matière organique, mais elle oblige à utiliser des produits chimiques puissants qui dissoudront les composés organiques, ou des appareils spécialisés.

Les corrélations établies entre les mesures de la matière organique et les dosages du carbone organique sont assez précises, mais la teneur en carbone de la matière organique peut varier en fonction de la source et de l'âge du matériau. Par conséquent, les mesures peuvent varier légèrement selon la méthode employée.

En Ontario, la méthode de la perte par calcination est considérée comme étant suffisamment précise pour les sols agricoles. Aux fins de la recherche scientifique toutefois, on privilégie la détermination de la matière organique par dosage du carbone organique, en raison de sa plus grande précision. La teneur en matière organique du sol est d'environ 1,8 à 2,0 fois la teneur en carbone organique.

Perte par calcination (PPC)

La perte par calcination (PPC) permet de mesurer directement la teneur du sol en matière organique. On calcine les échantillons en les plaçant pendant une nuit dans un four à moufle à 425 °C, puis on en compare les masses avant et après la calcination. Il faut éviter les températures plus élevées car les carbonates présents dans le sol se fractionneraient, causant une surestimation de la teneur du sol en matière organique. Le pré-séchage des échantillons à 120 °C réduit la variabilité du test.

Détermination du carbone organique

Méthode Walkley Black modifiée

La méthode Walkley Black repose sur le principe que le bichromate de potassium oxyde le carbone contenu dans le sol. Le bichromate de potassium change de couleur selon la quantité de produits réduits, ce qui permet d'établir un lien entre le changement de couleur et la quantité de carbone organique présent. La solution finale est mesurée sur un spectromètre et comparée à un graphique ou à une norme.

Commentaires

- Cette méthode mesure le carbone organique, plutôt que la matière organique. Le facteur de conversion lui-même peut être une source d'erreur. De plus, certains composés organiques ne s'oxydent pas totalement en présence du bichromate, ce qui sous-estime les résultats.
- Cette méthode ne convient pas aux sols qui renferment plus de 7,5 % de matière organique.
- Les réactifs utilisés dans cette analyse sont toxiques et doivent être éliminés en tant que déchets dangereux.

Four à combustion

Ce four brûle l'échantillon à une température supérieure à 900 °C, ce qui permet de mesurer la concentration de dioxyde de carbone dégagée, soit le carbone total. Les résultats sont rapides et précis, mais le matériel est coûteux.

Ensuite, on calcine pendant la nuit un autre échantillon dans un four à moufle, afin d'éliminer le carbone organique. Le carbone inorganique (carbonate) présent dans les résidus est mesuré. La concentration de carbone organique correspond à la différence entre le carbone total et le carbone inorganique.

Texture du sol

Évaluation de la texture

Pour la plupart des échantillons, la texture du sol ne fait pas l'objet d'une analyse, mais est plutôt évaluée au toucher. Dans la plupart des rapports, la texture du sol correspond à une lettre. Les quatre catégories sont G (grossière), pour le sable et le loam sableux; M (moyenne), pour le loam; F (fine) pour l'argile ou le loam argileux; O (organique).

Ces catégories ne visent qu'à donner au client un aperçu de la texture. Cette information peut constituer une confirmation que les échantillons proviennent bien des bons champs.

Mesure de la texture

La texture du sol peut être mesurée en dispersant le sol dans une solution à teneur élevée en sodium comme du calgon ou du phosphate trisodique et en mesurant la quantité de sol qui se dépose au fil du temps. Cette méthode repose sur le principe que les grosses particules se déposeront plus vite que les petites. Après 30 secondes à 1 minute, tout le sable se sera déposé. De 6 à 24 heures plus tard, tout le limon se sera déposé, laissant l'argile en suspension. Cette technique s'utilise avec une pipette ou un hydromètre qui mesure la concentration de sol en suspension pendant ces périodes.

Le technicien utilise une pipette pour prélever un échantillon de la solution. La solution prélevée avec la pipette est mise à sécher dans un four. Après séchage, on établit la masse du contenu en sol de la pipette.

Le technicien peut aussi utiliser un hydromètre spécial pour mesurer la densité de la suspension. Au fur et à mesure que le sol se dépose, la densité diminue et l'hydromètre descend.

La méthode de la pipette est plus précise que celle de l'hydromètre, mais plus coûteuse et plus fastidieuse.

Habituellement, la matière organique n'influence pas vraiment la mesure de la texture. Une quantité de matière organique peut être déduite de la fraction de limon ou d'argile. Avant de déterminer la texture, la matière organique peut aussi être enlevée par des moyens chimiques.

Une fois que les proportions de sable, de limon et d'argile ont été déterminées, la classe de texture est déterminée, comme l'illustre la figure 5-1.

Taille des particules dans les fractions de sols

Sable	De 0,05 à 2 mm
Limon	De 0,002 à 0,05 mm
Argile	<0,002 mm

Les particules plus grosses que 2 mm (gravier et pierres) ne sont pas prises en compte dans la détermination de la texture du sol.

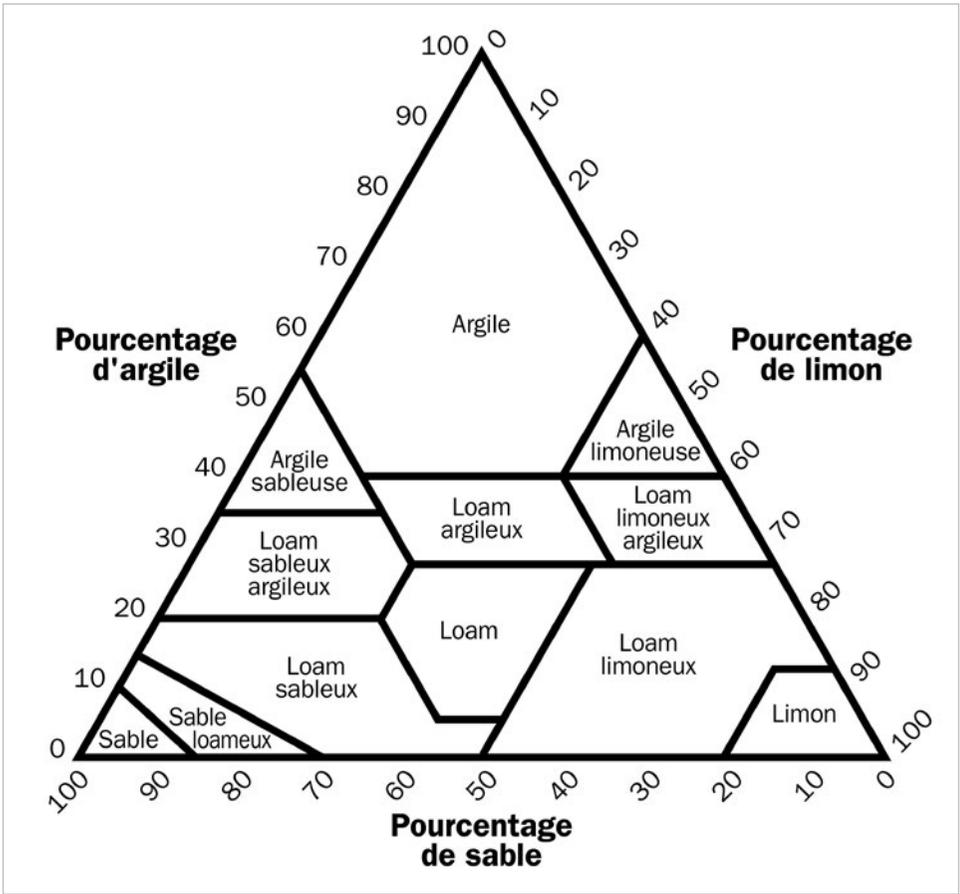


Figure 5-1. Triangle des textures du sol.

Cette figure fait ressortir le lien entre les noms des classes de texture de sol et la distribution granulométrique. Après avoir évalué les teneurs en limon et en argile d'un échantillon, on repère les valeurs correspondantes sur les côtés « limon » et « argile » du triangle. On trace ensuite des droites vers l'intérieur, parallèles dans le premier cas au côté « argile » du triangle et dans le deuxième cas au côté « sable ». Le point de rencontre des deux droites correspond à la classe texturale auquel l'échantillon appartient.

Capacité d'échange cationique et taux de saturation en bases

La capacité d'échange cationique (CEC) et le taux de saturation en bases ne sont pas utilisés pour préparer des recommandations de fertilisation en Ontario. Lors d'essais de calibrage où ces facteurs ont été tenus pour compte, la précision des recommandations de fertilisation n'a pas été améliorée et a parfois même diminué.

Bien des rapports d'analyse de sol précisent toutefois cette information. Elle est utile du fait qu'elle fournit une indication générale de la fertilité des sols et peut permettre de cerner d'éventuels problèmes culturaux. Le fait de savoir comment l'on obtient cette information peut aider à la replacer en perspective.

Remarque :

La capacité d'échange cationique est mesurée en unités de charge électrique plutôt qu'en poids, puisque le poids par unité de charge des cations varie grandement.

La CEC s'exprime en centimole de charge positive par kilogramme (cmol+/kg). Cette unité de mesure est préférée aux milliéquivalents par 100 grammes de sol, mais les nombres sont les mêmes dans chaque cas. Pour convertir des parties par million en centimoles par kilogramme, on divise les ppm par 10 fois le poids atomique du cation, divisé par sa charge. Par exemple, si le dosage du magnésium (de poids atomique 24 et de charge 2+) révélé par l'analyse de sol est de 480 ppm, la CEC se calculerait comme suit : $480 / [(24 * 10) / 2] = 4$ centimoles par kilogramme.

Capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique (CEC) donne une idée du potentiel de fertilité du sol en mesurant la capacité totale de ce sol à retenir les cations compris dans les éléments nutritifs. Pour une discussion approfondie, consultez le début du chapitre 2.

Les sites d'échange cationique constituent la principale source de cations que peuvent assimiler les végétaux. La CEC peut être mesurée directement ou être estimée en ajoutant le total de cations mesuré dans une analyse de sol.

Estimation de la CEC

On estime souvent la capacité d'échange cationique à partir des éléments nutritifs extraits à l'acétate d'ammonium. Cette méthode suppose que seuls les éléments nutritifs qui occupent les sites d'échange cationique sont extraits, ce qui n'est pas toujours le cas. La présence de carbonate de calcium (chaux) dans les sols à pH élevé peut fausser les estimations de la capacité d'échange cationique, parce que l'acétate d'ammonium dissoudra aussi une certaine portion de ce calcium.

Une autre méthode rapide pour obtenir une estimation de la CEC consiste à utiliser le pourcentage d'argile et de matière organique. On multiplie le pourcentage d'argile par 0,5 et le pourcentage de matière organique par 2. La somme des produits obtenus donne une estimation de la capacité d'échange cationique du sol.

Formule pour estimer la capacité d'échange cationique

Valeur de la CECb = $(Ca \div 200) + (K \div 390) + (Mg \div 120)$

(CECb = capacité d'échange cationique basique)

où chaque valeur de Ca, de K et de Mg (mg/kg de sol) est obtenue par extraction à l'acétate d'ammonium. Cette équation les convertit en centimoles par kilogramme.

Un facteur est également ajouté pour la teneur du sol en H⁺ :

- si le pH varie entre 6,0 et 7,0, la CEC = CECb + 1,2
 - si le pH est supérieur à 7,0, la CEC = CECb.
 - si le pH est inférieur à 6,0, la CEC = CECb + {1,2 x [70 - (pH₈ x 10)]}.
- (pH₈ = pH tampon)

Cette formule, élaborée au Michigan, tient compte du pH du sol et de la charge électrique de chaque cation. Elle ne prend pas en compte la présence d'autres cations comme l'aluminium ni la quantité du calcium ou du magnésium dissous provenant des carbonates libres du sol.

Une autre méthode rapide pour obtenir une estimation de la CEC consiste à utiliser le pourcentage d'argile et de matière organique. On multiplie le pourcentage d'argile par 0,5 et le pourcentage de matière organique par 2. La somme des produits obtenus donne une estimation de la capacité d'échange cationique du sol.

Mesure de la CEC

On peut obtenir en laboratoire une indication plus précise de la capacité d'échange cationique en inondant l'échantillon de sol d'un cation marqueur spécifique, ce qui expulse tous les autres cations des sites d'échange. Ce cation marqueur est ensuite extrait avec la solution d'acétate d'ammonium. Cette solution est ensuite analysée pour déterminer la quantité du cation marqueur, laquelle représente la capacité d'échange cationique totale.

Le baryum est un bon ion marqueur parce qu'il n'est pas un élément très répandu dans les sols et qu'il possède une affinité assez forte pour expulser les autres cations des sites d'échange.

Pourcentage de saturation en bases

On entend par « pourcentage de saturation en bases » le rapport, exprimé en pourcentage, des cations basiques par rapport à la capacité d'échange cationique (consultez les équations sur le pourcentage de saturation en bases

qui suivent). Le terme est souvent utilisé de manière vague. Il peut se rapporter à chaque cation individuel ou à la somme de tous les cations basiques.

Lorsqu'on calcule et interprète le pourcentage de saturation en bases, il faut être prudent parce que cette valeur dépend de la façon dont on obtient la CEC. Ainsi, une valeur de saturation en potassium dérivée d'une estimation de la CEC dans un sol calcaire sera trompeuse, en raison des valeurs artificiellement élevées du calcium et du magnésium.

Règle générale, le pourcentage de saturation en bases devrait croître avec l'augmentation du pH et de la fertilité du sol.

Équations des pourcentages de saturation en bases

% de saturation en Ca = $(\text{ppm Ca} \div 200 \div \text{CEC}) \times 100$

% de saturation en K = $(\text{ppm K} \div 390 \div \text{CEC}) \times 100$

% de saturation en Mg = $(\text{ppm Mg} \div 120 \div \text{CEC}) \times 100$

Matériel de laboratoire

Analyseur automatique

Cet appareil permet d'automatiser les tâches répétitives de l'analyse chimique. On peut mesurer la concentration de la plupart des éléments d'un extrait de sol ou de plante par réaction avec certains composés chimiques qui donnent une réaction chromogène. L'intensité de la couleur est liée à la concentration de l'élément nutritif.

Dans l'analyseur automatique, on place dans de minuscules tubulures de plastique de petits échantillons d'extraits séparés les uns des autres par des bulles d'air. D'autres produits chimiques sont introduits dans le tube dans des proportions adéquates et sont agités. Le mélange peut être chauffé ou refroidi ou mis en contact avec un catalyseur. Le produit passe dans une cellule photoélectrique qui mesure l'intensité de la couleur produite. Une analyse spécifique est nécessaire pour le dosage de chaque élément nutritif, même si, souvent, les analyses peuvent être effectuées en parallèle, ce qui permet de faire subir deux ou plusieurs analyses à un ensemble d'échantillons.

On utilise couramment ces appareils pour le dosage des nitrates, de l'ammonium et du phosphore.

L'analyseur automatique est beaucoup plus rapide que les analyses manuelles, mais il doit être soigneusement calibré à l'aide d'une gamme de solutions de réserve pour qu'une corrélation précise puisse être établie avec les concentrations réelles. Un contrôle constant de la qualité s'impose.

Absorption atomique

Les appareils d'absorption atomique font appel à une flamme qui désintègre l'extrait en ses éléments, puis balayent la flamme d'un faisceau lumineux qui mesure la lumière absorbée par les atomes. Chaque élément absorbe la lumière à une longueur d'onde spécifique, de sorte que la source lumineuse produit un faisceau d'une longueur d'onde spécifique selon l'élément dosé. La concentration de l'élément est proportionnelle à la quantité de lumière absorbée. La température de la flamme est importante pour garantir que les composés sont désintégrés en atomes.

Puisque les atomes qui composent l'air absorbent également la lumière, on ne peut utiliser cette méthode pour les éléments dont les longueurs d'onde d'absorption se situent dans la même fourchette que celles des éléments présents dans l'air. Cela signifie qu'il n'est pas possible d'utiliser la spectrométrie d'absorption atomique pour doser l'azote, le phosphore, le soufre ou le bore. Cette méthode peut s'utiliser pour plusieurs oligo-éléments (Fe, Mn, Zn, Cu, par exemple) et les éléments des terres alcalines (K, Ca, Mg).

Spectrométrie d'émission

À des températures très élevées et dans des champs électriques puissants, on peut obtenir une excitation des atomes, qui émettent alors de la lumière. Chaque élément émet de la lumière à une fréquence spécifique, que l'on peut mesurer à l'aide d'une cellule photoélectrique. L'intensité de l'émission lumineuse indique la quantité de chaque élément présent.

Le spectromètre d'émission au plasma inductif (ICP) ou le spectromètre à plasma-arc (DCP) permettent de mesurer rapidement la concentration d'éléments dans une solution. On passe un minuscule échantillon d'extrait de sol ou de végétaux simultanément à travers la flamme d'une torche produisant des températures élevées et à travers un fort champ magnétique destiné à exciter les atomes. Quand les atomes excités reviennent à leur état stable, ils émettent des ondes lumineuses à des longueurs d'onde spécifiques. L'intensité de l'émission indique la quantité de chaque élément présent.

Cet instrument donne des mesures précises des éléments totaux présents dans la solution d'extraction pour une fourchette relativement étendue de concentrations, mais il faut le calibrer soigneusement à l'aide de solutions de réserve pour chaque élément.

En Ontario, avec l'agent d'extraction au bicarbonate, le spectromètre d'émission au plasma inductif n'est pas utilisé en raison de difficultés mécaniques posées par la solution elle-même.

Analyse au laser

La spectroscopie par claquage induit par éclair laser utilise un instrument qui n'exige aucun agent d'extraction ou produit chimique spécial, ne crée aucun déchet, réalise 3 000 lectures par échantillon et convertit les valeurs totales en valeurs calibrées extractibles.

Matières organiques (tissus végétaux et fumier)

Manutention et préparation

Tissus végétaux

Les échantillons de tissus végétaux peuvent être expédiés au laboratoire frais, ou séchés à l'air s'ils ne peuvent être envoyés immédiatement. Ne jamais sécher les échantillons au four, puisque les températures élevées peuvent fausser les résultats.

Il est essentiel d'éviter la contamination par le sol, la poussière ou les engrais. Expédier les échantillons dans des sacs de papier, jamais de plastique, pour éviter la condensation et la moisissure.

Au laboratoire, on identifie, inscrit et sèche les échantillons. Les échantillons secs sont moulus, à une granulométrie de 1 mm ou moins et entreposés dans des contenants hermétiques à l'air jusqu'à l'analyse.

Fumier

Au laboratoire, les échantillons de fumier liquide sont analysés dès la réception. On agite les contenants en les renversant plusieurs fois avant de prélever l'échantillon.

Dans le cas du fumier solide, une partie de l'échantillon est réservée en vue du dosage de l'azote. Le reste est séché au four à 100 °C (212 °F) pendant la nuit, puis moulu pour être ensuite passé au tamis de 1 mm et entreposé dans un contenant hermétique à l'air jusqu'à l'analyse. La teneur en eau du fumier est déterminée en cours de séchage.

Azote

Méthode Kjeldahl

Jusque dans les années 1990, l'azote du fumier était le plus souvent mesuré à l'aide d'une analyse de laboratoire appelée azote total Kjeldahl. L'azote total Kjeldahl est une méthode non écologique qui utilise l'acide sulfurique pour digérer la matière organique, avec l'aide d'un catalyseur (habituellement de l'oxyde de mercure, du sélénium ou du cuivre). Actuellement, les laboratoires ontariens utilisent la méthode de Dumas et déclarent ce résultat sous la forme d'azote total. Avant que la méthode par combustion (Dumas) soit rentable, l'azote total Kjeldahl était la méthode normalement utilisée. Par conséquent, l'azote total et l'azote total Kjeldahl sont souvent synonymes. Cependant, le $\text{NO}_3\text{-N}$ n'est pas mesuré dans l'azote total Kjeldahl, ce qui fait une différence pour certains produits comme le lixiviat.

Méthode par combustion (Dumas)

Cette méthode permet de préciser la concentration d'azote total (azote ammoniacal, azote protéique et azote des nitrates) dans la matière organique. On fait calciner les échantillons dans un four et on recueille les gaz. On enlève l'oxygène, le dioxyde de carbone et l'eau, puis on détermine la teneur en azote gazeux par conductivité thermique.

En règle générale, le titrage de l'azote par combustion donne des valeurs légèrement supérieures à celles qu'on obtient par la méthode Kjeldahl traditionnelle, parce que cette dernière ne tient compte que de l'azote protéique et de l'azote ammoniacal.

Commentaires

- Il est indispensable que la grosseur et la finesse des particules soient uniformes. On recommande une granulométrie de 1 mm de diamètre ou moins.
- Il est également indispensable de calibrer et d'entretenir fréquemment les réactifs dans l'instrument.

Azote ammoniacal

On peut mesurer la quantité d'azote ammoniacal dans le fumier liquide à l'aide d'une électrode sensible à l'ammonium. Que la matière organique soit solide ou liquide, l'azote ammoniacal peut être mesuré par distillation à la vapeur ou par extraction de l'ammonium à l'aide d'une solution de KCl suivie du dosage de l'azote ammoniacal dans l'extrait. Comme il risque d'y avoir des pertes d'azote ammoniacal pendant le séchage, il est important de travailler avec un échantillon frais ou d'acidifier l'échantillon avant le séchage afin de retenir l'ammonium.

La quantité d'azote assimilable par les végétaux provenant du fumier ou de biosolides peut être plus précisément déterminée si l'on connaît les concentrations d'azote ammoniacal et d'azote organique plutôt qu'uniquement la concentration d'azote total. La concentration d'azote organique est présumée correspondre à la différence entre la concentration d'azote total et celle d'azote ammoniacal. La teneur en nitrates dans les échantillons de fumier brut est généralement insignifiante et n'est pas mesurée.

Calcium, phosphore, potassium, magnésium, manganèse, cuivre, fer, bore

On détermine la concentration de ces éléments après oxydation (calcination) des tissus végétaux et dissolution des cendres dans l'acide. Les échantillons sont brûlés pendant deux heures à 550 °C. Les digestats acides sont ensuite analysés pour en déterminer la teneur en éléments nutritifs. Certains éléments, par exemple le phosphore, le potassium, le bore et le cuivre, tendent à se volatiliser à des températures élevées.

Métaux réglementés dans les biosolides

La réglementation actuelle limite les concentrations de onze métaux qui peuvent se retrouver dans des matières de source non agricole destinées à être épandues sur des terres. Il s'agit de l'arsenic, du cadmium, du cobalt, du chrome, du cuivre, du plomb, du mercure, du molybdène, du nickel, du sélénium et du zinc. Le dosage de ces métaux se fait par dissolution de la matière organique dans un acide puissant, puis par l'analyse des concentrations des éléments dans le digestat. Dans le cas du mercure, pour éviter qu'il ne se dégage de vapeurs toxiques, la procédure employée est légèrement différente.

Sept des métaux réglementés sont des éléments nutritifs indispensables à la vie animale ou végétale. Si les concentrations ainsi obtenues constituent des indicateurs utiles des risques d'accumulation de ces éléments à des niveaux dangereux dans les sols, elles renseignent peu par contre sur leur biodisponibilité pour les végétaux.

Bibliographie

Information générale

Black, Charles A. 1993. *Soil Fertility Evaluation and Control*. Lewis Publishers.

Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale et W.L. Nelson, 2005. *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. 7^e éd. Pearson Education Inc., Upper Saddle River, New Jersey 07458.

Pour plus de détails

Brown, J.R., éd. 1987. *Soil Testing: Sampling, Correlation, Calibration, and Interpretation*, dans SSSA Special Publication numéro 21.

Carter, Martin L., éd. 1993. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Société canadienne de la science du sol.

Kalra, Y. P. et D. G. Maynard, 1991. *Methods Manual for Forest Soil and Plant Analysis*. Forêts Canada, région du Nord-Ouest, Centre de foresterie du Nord, Edmonton, Alberta. Rapport d'information NOR-X-319.

Miller, Robert O. et Janice Kotuby-Amacher. 1996. *Western States Laboratory Proficiency Testing Program Soil and Plant Analytical Methods, Version 3.00*. Université de l'État de l'Utah.

North Central Region - 13. 1988. *Recommended Chemical Soil Test Procedures for the North Central Region*. Université du Dakota du Nord Bulletin n° 499.

Northeast Coordinating Committee on Soil Testing. 1995. *Recommended Soil Testing Procedures for the Northeastern United States*. 2^e éd. Université du Delaware Bulletin n° 493.

Page, A.L., éd. 1982. *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy.

6. Sources organiques d'éléments nutritifs : fumier, biosolides, légumineuses

Les sources organiques d'éléments nutritifs sont des matières qui renferment du carbone et qui ont déjà fait partie d'un organisme vivant. Les sources d'éléments nutritifs organiques les plus fréquemment utilisées dans les exploitations agricoles de l'Ontario sont le fumier de bétail et les résidus de culture comme les légumineuses fourragères. Il existe aussi des matières provenant de sources municipales ou industrielles connues collectivement sous le nom de matières de source non agricole (MSNA) pouvant être épandues au sol (p. ex. des biosolides). L'engrais à base d'urée, même s'il contient du carbone dans sa structure chimique, est fabriqué et il n'est pas par conséquent considéré normalement comme une source d'élément nutritif organique.

À des fins de gestion, on divise les sources organiques d'éléments nutritifs en deux groupes, selon qu'il s'agit de matières à épandre ou de résidus de cultures. Les matières d'épandage, comme le fumier, les biosolides et le compost, peuvent être appliquées à des doses, à des moments et à des endroits différents, de manière à répondre aux besoins nutritifs d'une culture en particulier. Par comparaison, l'utilisation des résidus de culture se limite aux champs où les cultures ont poussé. Même si tous les types de résidus de culture influenceront le cycle des éléments nutritifs dans le sol, les légumineuses fourragères fournissent la plus grande quantité d'éléments nutritifs aux cultures qui suivent. Les cultures de couverture peuvent aussi servir à capturer l'excès d'éléments nutritifs et à les transmettre à la culture qui suivra.

Les éléments nutritifs organiques ne sont pas que pour l'agriculture biologique

Même si l'agriculture biologique utilise des sources d'éléments nutritifs organiques, ces matières peuvent tout aussi bien être utilisées dans un système cultural classique. Dans les deux systèmes, la clé consiste à gérer les matières organiques pour offrir des éléments nutritifs, sous des formes assimilables, à la culture tout en évitant les épandages excessifs. La différence réside dans le fait que les systèmes classiques donnent à l'agriculteur l'option de combler les manques d'éléments nutritifs dans les matières organiques par des engrais commerciaux. Les producteurs biologiques peuvent recourir à l'occasion à des apports supplémentaires, mais le choix des produits autorisés est plus restreint.

Éléments nutritifs tirés des matières d'épandage

Similitudes entre les matières

Il existe une vaste gamme de matières de source organique qu'on peut utiliser comme sources d'éléments nutritifs, mais elles possèdent certaines caractéristiques communes. Elles contiennent toutes un mélange de sources d'éléments nutritifs minéraux et de matières organiques, dans des proportions variables qui dépendent de la ration du bétail, de la matière première, des sources de carbone, de la quantité et du type de litière ou des produits de dilution, ainsi que de l'entreposage ou du traitement des matières.

Les éléments nutritifs de source minérale présents dans la matière organique sont

des produits chimiques identiques aux éléments nutritifs qu'on trouve dans les engrais commerciaux et ils se présentent sous des formes immédiatement assimilables par les cultures. Cependant, les éléments nutritifs des engrais commerciaux peuvent être perdus plus facilement dans l'environnement comparativement aux mêmes éléments nutritifs liés à un composé organique. Dans le fumier, par exemple, l'azote est fractionné en composés organiques et en azote ammoniacal. L'azote ammoniacal est le même composé chimique que l'hydroxyde d'ammonium ou que le gaz ammoniac qui se serait dissous dans l'eau du sol. L'ammonium est immédiatement assimilable par les végétaux, mais comme l'hydroxyde d'ammonium, si cette matière est laissée sur la surface du sol, elle se vaporisera dans l'air et sera perdue comme ammoniac. Ainsi l'azote biodisponible provenant du fumier se trouve considérablement réduit s'il n'est pas incorporé dans le sol. La proportion d'azote ammoniacal dans différentes matières organiques est présentée dans le tableau 6-1.

Les composés organiques sont moins sujets à des pertes. Ils ne sont pas assimilables par les végétaux jusqu'à ce qu'ils soient minéralisés (dégradés dans des formes minérales) par les bactéries et autres organismes terricoles ou par réduction chimique. La vitesse à laquelle se déroule la minéralisation dépend de la facilité avec laquelle les composés organiques se dégradent, des conditions de sol (température, humidité, aération, pH, etc.) et du contact physique entre les matières et le sol.

Que la matière soit d'origine humaine ou animale importe moins que la façon dont la matière est gérée. Toutes les matières subissent des transformations chimiques et biologiques semblables dans le sol.

Tableau 6-1. Proportion de l'azote total présent sous forme d'ammonium*
(valeurs types exprimées en % de l'azote total épandu)

Type d'élément nutritif	N ammoniacal
fumier liquide de porc	66 %
fumier liquide de bovins laitiers	42 %
fumier liquide de bovins de boucherie	43 %
fumier liquide de volaille	67 %
fumier solide de porc	26 %
fumier solide de bovins laitiers	21 %
fumier solide de bovins de boucherie sur litière épaisse	12 %
fumier solide de chevaux	15 %
fumier solide de poulets à griller	6 %
fumier solide de pondeuses	46 %
fumier de bovins composté	0,6 %
biosolides d'épuration municipaux :	
aérobies	1,6 %
anaérobies	35 %
déshydratés	12 %
stabilisés à la chaux	traces
biosolides de papeterie	traces
compost de déchets de champignons	5 %

* La teneur en azote ammoniacal augmente au fur et à mesure que la concentration de liquide dans la matière augmente. *Source* : base de données sur le fumier NMAN3

Différences entre les matières

La différence fondamentale entre les différents types de fumier et entre le fumier et les autres fertilisants organiques tient à la quantité et au type de produit de dilution ajouté ou enlevé et au traitement que subit le mélange de matières avant son épandage. Sur la plupart des fermes d'élevage, l'urine et les fèces sont mélangées avec soit de la litière pour former du fumier solide, soit de l'eau pour former du fumier liquide. La totalité du produit résultant est normalement épandu sur les terres. Les biosolides d'épuration municipaux, par ailleurs, sont fortement dilués lorsqu'ils arrivent à l'usine de traitement. Le but du

traitement des eaux usées est d'extraire et de nettoyer le gros de l'eau avant son rejet dans l'environnement. La portion restante (un sous-produit de ce procédé) subit une transformation plus poussée pour un marché spécifique (p. ex. N-Viro) ou est épandue au sol.

Type de bétail et régime

La forme et la teneur en éléments nutritifs du fumier varieront d'une ferme à l'autre. On ne sert pas le même type de ration aux différentes espèces animales; on sert en général des rations riches en fourrages aux ruminants et des rations plus concentrées aux monogastriques (comme les porcs ou la volaille). Cela signifie que le fumier de ruminant renferme davantage de fibres et de plus faibles concentrations d'éléments nutritifs que la plupart des fumiers de porcs ou de volaille. Comme les rations destinées aux jeunes animaux sont normalement plus riches en protéines et en minéraux que les aliments destinés aux animaux à maturité, le fumier de jeunes animaux renferme également de plus fortes concentrations d'éléments nutritifs. Tout changement apporté à la ration, comme l'ajout de phytase ou l'équilibrage des acides aminés dans le but de réduire les besoins en protéines, aura des répercussions importantes sur la teneur en éléments nutritifs du fumier excrété par l'animal. Les teneurs moyennes en macro-éléments et en oligo-éléments pour différents types de fumier sont présentées dans le tableau 6-2.

Certains fumiers sont traités pour diverses fins. La séparation des liquides et des solides, par exemple, peut servir à séparer les solides de fumier afin qu'ils soient réutilisés comme fine couche de litière. Le compostage est un processus aérobie qui réduit grandement le volume du fumier et peut améliorer son aptitude d'épandage. Les ratios carbone:azote et la teneur en

humidité sont extrêmement importants dans le compostage : si la matière est correctement gérée et traitée, l'azote est incorporé aux composés organiques et les quantités de nitrates et d'ammonium restants sont négligeables. La digestion anaérobie est un procédé qui convertit une partie des composés organiques contenus dans le fumier en gaz méthane destiné au chauffage ou à la production d'électricité, et qui laisse le gros de l'azote sous forme d'azote ammoniacal.

Options pour réduire la teneur en éléments nutritifs du fumier

- **Équilibrer correctement la ration.** L'excédent d'éléments nutritifs sur les besoins des animaux sera simplement excrété. L'alimentation multiphase et l'alimentation selon le sexe de l'animal permettent de régler les rations en fonction des besoins précis des animaux à différentes phases de production. Une analyse du fumier qui tient compte des oligo-éléments peut être utile en comparant les éléments nutritifs du fumier aux valeurs moyennes pour un type donné de bétail.
- **Réduire au minimum le gaspillage d'aliments.** Inspecter, régler et nettoyer périodiquement les distributeurs d'aliments et opter pour les modèles de distributeurs qui réduisent au minimum le gaspillage.
- **Ajouter de la phytase aux rations** pour les porcs et la volaille et réduire en conséquence le phosphore supplémentaire. Cela leur permet de digérer une grande partie du phosphore en grains qui autrement ne serait pas biodisponible et qui se retrouverait donc dans le fumier.
- **Équilibrer les acides aminés dans les aliments** afin que le bétail en ait suffisamment pour satisfaire à ses besoins sans avoir à lui donner des surplus de protéines. Cela réduira la teneur en azote du fumier.

Tableau 6–2. Teneurs moyennes en éléments nutritifs des fumiers d'élevage liquides et solides

Données tirées des analyses de fumier faites par des laboratoires ontariens entre 1992 et 2018. Les données sur les oligo-éléments proviennent d'un sous-ensemble de données plus petit. Les concentrations d'oligo-éléments sont étroitement liées à l'alimentation des animaux, d'où des variations importantes d'une ferme à l'autre. Une analyse réelle est la meilleure source de renseignements.

LÉGENDE : — = données non disponibles MS moy. = matière sèche moyenne comp. = composite

Type de fumier	Sous-type de fumier	MS moy. (%)	N ¹ total (%)	NH ₄ -N (ppm)	P (%) ²	K (%)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	S (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Mn (ppm)
Fumiers de bétail liquides												
Porcs	truies	1,7	0,24	0,18	0,06	0,11	550	275	50	60	20	10
	porcelets sevrés	2,3	0,28	0,19	0,09	0,15	775	400	150	75	25	15
	de finition	4,9	0,52	0,36	0,15	0,27	1 900	1 500	700	115	50	40
	du cochonnage à la finition	3,8	0,43	0,29	0,10	0,21	1 500	650	300	100	35	25
Bovins laitiers	comp.	8,6	0,39	0,16	0,09	0,25	3 500	1 100	350	35	15	30
	épais	14,1	0,53	0,18	0,14	0,31	4 250	3 350	500	115	35	95
	fluide	4,4	0,25	0,12	0,04	0,19	2 500	700	300	100	35	30
	aqueux	1,1	0,12	0,06	0,02	0,11	375	150	45	45	15	5
Bovins	comp.	8,6	0,37	0,15	0,08	0,23	4 000	1 850	350	50	10	50
Ruissellement	comp.	0,6	0,05	0,03	0,01	0,08	250	110	50	5	3	2
Vison	comp.	3,6	0,45	0,26	0,12	0,10	1 000	285	450	80	5	10
Veau (nourri au lait)	comp.	1,5	0,08	0,06	0,02	0,18	—	—	—	—	—	—
Poulets	pondeuses	9,9	0,81	0,56	0,27	0,29	15 000	850	1 500	70	10	65
	poulettes	15,3	1,04	0,62	0,40	0,34	22 000	1 000	—	80	10	85
Biosolides	aérobic	2,0	0,12	0,01	0,06	0,00	—	—	—	—	—	—
	anaérobic	4,4	0,28	0,08	0,14	0,00	—	—	—	—	—	—
Fumiers de bétail solides												
Porcs	comp.	30,8	0,93	0,29	0,49	0,57	5 000	2 050	—	160	75	150
Bovins laitiers	litière légère	21,2	0,69	0,16	0,20	0,60	7 000	2 500	1 000	90	25	90
	litière lourde	41,0	0,82	0,11	0,21	0,66	10 000	4 500	550	50	20	90
Bovins	litière légère	24,1	0,70	0,14	0,22	0,55	8 500	3 500	—	100	30	100
	litière moyenne	34,5	1,03	0,20	0,37	0,74	10 000	3 200	—	140	30	110
	litière lourde	45,6	1,34	0,25	0,54	0,87	11 500	3 000	—	150	30	120
Ovins	comp.	32,2	0,87	0,28	0,34	0,76	14 000	3 800	—	240	20	140
Chèvres laitières	comp.	35,7	1,04	0,28	0,28	1,03	15 000	1 100	—	50	20	50
Compost	traité	45,7	0,84	0,00	0,26	0,45	21 000	4 000	1 350	80	40	110
	immature	47,2	1,32	0,12	0,41	1,05	25 000	3 600	1 350	85	40	110
Veau (nourri au grain)	comp.	30,5	0,79	0,14	0,19	0,51	7 000	3 000	—	75	10	65
Chevaux	comp.	37,4	0,50	0,07	0,15	0,43	9 000	2 500	—	70	25	110
Vison	comp.	45,8	3,28	1,42	1,82	0,79	20 500	2 000	6 800	800	30	140

¹ N total = N ammoniacal + N organique

² % de P = phosphore total

Tableau 6–2. Teneurs moyennes en éléments nutritifs des fumiers d'élevage liquides et solides

Données tirées des analyses de fumier faites par des laboratoires ontariens entre 1992 et 2018. Les données sur les oligo-éléments proviennent d'un sous-ensemble de données plus petit. Les concentrations d'oligo-éléments sont étroitement liées à l'alimentation des animaux, d'où des variations importantes d'une ferme à l'autre. Une analyse réelle est la meilleure source de renseignements.

LÉGENDE : — = données non disponibles MS moy. = matière sèche moyenne comp. = composite

Type de fumier	Sous-type de fumier	MS moy. (%)	N ¹ total (%)	NH ₄ -N (ppm)	P (%) ²	K (%)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	S (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Mn (ppm)
Fumiers de bétail solides (suite)												
Poulets	pondeuses	37,3	2,07	0,81	1,00	0,98	48 000	600	3 000	230	30	220
	poulettes	42,6	3,19	0,70	1,38	1,39	—	—	—	—	—	—
	à griller	66,1	3,12	0,66	1,41	1,79	21 571	800	3 500	380	50	350
	éleveurs de poulets reproducteurs de type à griller	62,8	1,88	0,29	1,42	1,29	—	—	—	—	—	—
	pondeuses reproductrices de type à griller	65,1	2,21	0,32	1,58	1,56	—	—	—	—	—	—
Dindons	dindes lourdes	52,3	2,62	0,87	1,38	1,59	12 700	2 800	—	—	—	—
	dindonneaux reproducteurs	70,5	3,31	0,66	0,90	1,22	—	—	—	—	—	—
	à griller	54,8	2,16	0,86	1,30	1,35	23 000	7 000	—	—	—	—
	à griller	61,8	3,35	0,60	1,21	1,42	26 000	7 000	—	500	200	530
Biosolides	comp.	32,1	3,76	0,64	1,31	0,11	—	—	—	—	—	—

¹ N total = N ammoniacal + N organique

² % de P = phosphore total

Manutention et traitement du fumier

Le système de manutention et de collecte du fumier dans la grange mélangera le fumier avec différents produits de dilution. Dans les systèmes de fumier solide, il s'agit de paille ou de copeaux de bois utilisés pour la litière, alors qu'il s'agit plutôt de l'eau qui s'écoule des abreuvoirs ou des eaux de lavage dans

les systèmes de fumier liquide. Il y a une variabilité énorme dans la quantité de dilution de différents systèmes. Les quantités typiques d'éléments nutritifs biodisponibles pour différents types de fumier et de fertilisants organiques sont présentées dans les tableaux 6-2 à 6-7.

Tableau 6-3. Quantités approximatives d'éléments nutritifs biodisponibles tirés des types de fumier liquide (comme épandus) — kg/m³

Type de fumier	Sous-type de fumier	Matière sèche moy. (%)	Azote ¹		P ₂ O ₅ ³	K ₂ O	Nombre d'échantillons
			Épandage à l'automne ²	Épandage au printemps			
Porcs	truies	1,7	0,8	1,6	0,6	1,2	327
	porcelets sevrés	2,3	1,0	1,9	0,8	1,6	77
	de finition	4,9	1,8	3,3	1,4	2,9	458
	du cochonnage à la finition	3,8	1,5	2,8	0,9	2,3	119
Bovins laitiers	composite	8,6	1,2	1,8	0,8	2,7	2 449
	épais	14,1	1,6	2,1	1,3	3,3	724
	fluide	4,4	0,8	1,3	0,4	2,1	532
	aqueux	1,1	0,4	0,8	0,2	1,2	128
Bovins	composite	8,6	1,1	1,6	0,7	2,5	154
Ruissellement	composite	0,7	0,2	0,3	0,1	1,0	49
Vison	composite	3,6	1,6	3,1	0,9	1,0	22
Veau (nourri au lait)	composite	1,5	0,2	0,4	0,2	1,9	3
Poulets	pondeuses	9,9	2,8	4,8	2,5	3,1	81
	poulettes	15,3	3,6	5,8	3,7	3,7	11
Biosolides	aérobie	2,0	0,4	0,8	0,6	0,0	10
	anaérobie	4,4	1,0	1,7	1,3	0,0	39

¹ Azote utilisable = quantité d'azote assimilable dans l'hypothèse où la matière est incorporée dans les 24 heures

² Présumer d'une date d'épandage au début d'octobre

³ Le P₂O₅ assimilable représente la moitié de l'apport de phosphore qui est assimilable peu après l'épandage. Le reste du phosphore devient assimilable d'ici l'année suivante.

Données tirées d'analyses de fumier effectuées par l'Université de Guelph, Stratford Agri-Analysis, A&L Canada Labs et Agrifood Labs entre 1991 et 2018. Les concentrations d'oligo-éléments sont étroitement liées à l'alimentation des animaux, d'où des variations importantes d'une ferme à l'autre. Une analyse réelle est la meilleure source de renseignements.

On évalue le phosphate assimilable à 40 % de la teneur du fumier en phosphate total. On évalue le K₂O assimilable à 90 % de la teneur totale en K₂O.

Tableau 6–4. Quantités approximatives d'éléments nutritifs biodisponibles tirés des types de fumier liquide (comme épandus) — lb/1 000 gal

Type de fumier	Sous-type de fumier	Matière sèche moy. (%)	Azote ¹		P ₂ O ₅ ³	K ₂ O	Nombre d'échantillons
			Épandage à l'automne ²	Épandage au printemps			
			lb/1 000 gal				
Porcs	truies	1,7	8,4	16,3	5,5	11,9	327
	porcelets sevrés	2,3	9,8	18,9	8,3	16,2	77
	de finition	4,9	18,2	33,4	13,8	29,2	458
	du cochonnage à la finition	3,8	15,1	28,2	9,2	22,7	119
Bovins laitiers	composite	8,6	11,7	18,1	8,3	27,0	2 449
	épais	14,1	15,9	20,9	12,9	33,5	724
	fluide	4,4	7,5	13,4	3,7	20,5	532
	aqueux	1,1	3,6	8,4	1,8	11,9	128
Bovins	composite	8,6	11,1	16,3	7,4	24,8	154
Ruissellement	composite	0,7	1,5	2,9	0,9	9,7	49
Vison	composite	3,6	15,8	31,4	9,2	9,7	22
Veau (nourri au lait)	composite	1,5	2,4	3,7	1,8	19,4	3
Poulets	pondeuses	9,9	28,4	47,6	24,8	31,3	81
	poulettes	15,3	36,4	58,5	36,8	36,7	11
Biosolides	aérobie	2,0	4,2	7,8	5,5	0,0	10
	anaérobie	4,4	9,8	17,4	12,9	0,0	39

¹ Azote utilisable = quantité d'azote assimilable dans l'hypothèse où la matière est incorporée dans les 24 heures

² Présumer d'une date d'épandage au début d'octobre

³ Le P₂O₅ assimilable représente la moitié de l'apport de phosphore qui est assimilable peu après l'épandage. Le reste du phosphore devient assimilable d'ici l'année suivante.

Données tirées d'analyses de fumier effectuées par l'Université de Guelph, Stratford Agri-Analysis, A&L Canada Labs et Agrifood Labs entre 1991 et 2018. Les concentrations d'oligo-éléments sont étroitement liées à l'alimentation des animaux, d'où des variations importantes d'une ferme à l'autre. Une analyse réelle est la meilleure source de renseignements.

On évalue le phosphate assimilable à 40 % de la teneur du fumier en phosphate total. On évalue le K₂O assimilable à 90 % de la teneur totale en K₂O.

Tableau 6-5. Quantités approximatives d'éléments nutritifs biodisponibles tirés des types de fumier solides (comme épandus) — kg/tonne

Type de fumier	Sous-type de fumier	Matière sèche moy. (%)	Azote ¹		P ₂ O ₅ ³	K ₂ O	Nombre d'échantillons
			Épandage à l'automne ²	Épandage au printemps			
			kg/tonne				
Porcs	composite	30,8	3,7	3,6	4,5	6,2	80
Bovins laitiers	litière légère	21,2	2,1	3,0	1,8	6,5	86
	litière lourde	41,0	2,5	1,3	1,9	7,1	278
Bovins	litière légère	24,1	2,1	2,7	2,0	5,9	416
	litière moyenne	34,5	3,1	4,2	3,4	8,0	203
	litière lourde	45,6	4,0	5,3	5,0	9,4	157
Ovins	composite	32,2	2,6	2,8	3,1	8,2	73
Chèvres laitières	composite	35,7	3,1	3,9	2,6	11,1	45
Compost	traité	45,7	3,4	1,0	2,4	4,9	37
	immature	47,2	5,3	5,2	3,8	11,3	40
Veau (nourri au grain)	composite	30,5	2,4	2,6	1,7	5,5	16
Chevaux	composite	37,4	1,5	-1,3	1,4	4,6	41
Vison	composite	45,8	16,4	21,8	16,7	8,5	104
Poulets	pondeuses	37,3	10,4	12,6	9,2	10,6	224
	poulettes	42,6	16,0	23,2	12,7	15,0	78
	à griller	66,1	15,6	18,8	13,0	19,3	193
	éleveurs de poulets reproducteurs de type à griller	62,8	9,4	7,8	13,1	13,9	26
	pondeuses reproductrices de type à griller	65,1	11,1	10,7	14,5	16,8	74
Dindons	dindes lourdes	52,3	13,1	15,5	12,7	17,2	33
	dindonneaux	70,5	16,6	20,0	8,3	13,2	2
	reproducteurs	54,8	10,8	10,5	12,0	14,6	12
	à griller	61,8	16,8	21,9	11,1	15,3	6
Biosolides	composite	32,1	15,0	30,8	12,1	1,2	89

¹ Azote utilisable = quantité d'azote assimilable dans l'hypothèse où la matière est incorporée dans les 24 heures

² Présumer d'une date d'épandage au début d'octobre

³ Le P₂O₅ assimilable représente la moitié de l'apport de phosphore qui est assimilable peu après l'épandage. Le reste du phosphore devient assimilable d'ici l'année suivante.

Données tirées d'analyses de fumier effectuées par l'Université de Guelph, Stratford Agri-Analysis, A&L Canada Labs et Agrifood Labs entre 1991 et 2018. Les concentrations d'oligo-éléments sont étroitement liées à l'alimentation des animaux, d'où des variations importantes d'une ferme à l'autre. Une analyse réelle est la meilleure source de renseignements.

On évalue le phosphate assimilable à 40 % de la teneur du fumier en phosphate total. On évalue le K₂O assimilable à 90 % de la teneur totale en K₂O.

Tableau 6–6. Quantités approximatives d'éléments nutritifs biodisponibles tirés des types de fumier solides (comme épandus) — lb/tonne impériale

Type de fumier	Sous-type de fumier	Matière sèche moy. (%)	Azote ¹		P ₂ O ₅ ³	K ₂ O	Nombre d'échantillons
			Épandage à l'automne ²	Épandage au printemps			
Porcs	composite	30,8	7,4	7,1	9,0	12,3	80
Bovins laitiers	litière légère	21,2	4,1	6,1	3,7	13,0	86
	litière lourde	41,0	4,9	2,5	3,9	14,3	278
Bovins	litière légère	24,1	4,2	5,5	4,0	11,9	416
	litière moyenne	34,5	6,2	8,4	6,8	16,0	203
	litière lourde	45,6	8,0	10,7	9,9	18,8	157
Ovins	composite	32,2	5,2	5,5	6,3	16,4	73
Chèvres laitières	composite	35,7	6,2	7,8	5,2	22,2	45
Compost	traité	45,7	6,7	1,9	4,8	9,7	37
	immature	47,2	10,6	10,4	7,5	22,7	40
Veau (nourri au grain)	composite	30,5	4,7	5,2	3,5	11,0	16
Chevaux	composite	37,4	3,0	-2,5	2,8	9,3	41
Vison	composite	45,8	32,8	43,6	33,5	17,1	104
Poulets	pondeuses	37,3	20,7	25,2	18,4	21,2	224
	poulettes	42,6	31,9	46,4	25,4	30,0	78
	à griller	66,1	31,2	37,6	25,9	38,7	193
	éleveurs de poulets reproducteurs de type à griller	62,8	18,8	15,7	26,1	27,9	26
	pondeuses reproductrices de type à griller	65,1	22,1	21,4	29,1	33,7	74
Dindons	dindes lourdes	52,3	26,2	31,0	25,4	34,3	33
	dindonneaux	70,5	33,1	40,0	16,6	26,4	2
	reproducteurs	54,8	21,6	21,1	23,9	29,2	12
	à griller	61,8	33,5	43,9	22,3	30,7	6
Biosolides	composite	32,1	30,1	61,5	24,1	2,4	89

¹ Azote utilisable = quantité d'azote assimilable dans l'hypothèse où la matière est incorporée dans les 24 heures

² Présumer d'une date d'épandage au début d'octobre

³ Le P₂O₅ assimilable représente la moitié de l'apport de phosphore qui est assimilable peu après l'épandage. Le reste du phosphore devient assimilable d'ici l'année suivante.

Données tirées d'analyses de fumier effectuées par l'Université de Guelph, Stratford Agri-Analysis, A&L Canada Labs et Agrifood Labs entre 1991 et 2018. Les concentrations d'oligo-éléments sont étroitement liées à l'alimentation des animaux, d'où des variations importantes d'une ferme à l'autre. Une analyse réelle est la meilleure source de renseignements.

On évalue le phosphate assimilable à 40 % de la teneur du fumier en phosphate total. On évalue le K₂O assimilable à 90 % de la teneur totale en K₂O.

Tableau 6-7. Teneurs typiques en éléments nutritifs des fertilisants organiques municipaux (poids sec)

LÉGENDE : — = données non disponibles

Type de fertilisant	Matière	Matière sèche moy. (%)	Base matière sèche				
			Azote total (%)	NH ₄ -N (%)	N utilisable dans l'année d'épandage (%)	P ₂ O ₅ assimilable (%)	K ₂ O assimilable (%)
Biosolides d'épuration municipaux	aérobies	1,7	5,0	0,01-0,75	0,08	2,5	>0,01
	anaérobies	3,0	6,4	0,33-3,4	2,7	3,3	>0,01
	déshydratés	26	3,6	0,35-0,65	1,0	2,5	>0,01
	en granulés	—	—	traces	0,8	4,5	>0,01
Biosolides de papeterie	primaires	50	0,3	traces	0,1	traces	traces
	primaires + secondaires	32,8	2,5	—	1,4	,08	0,02
Drêches de distillerie	séchées	90	5,0	0,5	3,0	1,5	1,2
Autres fertilisants organiques	digestion anaérobie	3	5-10	7,0	8,3	3,3	3,7
	compost de résidus de jardin	60	1,6	traces	0,5	0,6	1,0
	compost de résidus alimentaires	70	3,3	0,1-0,4	1,1-1,4	1,5	1,9
	compost de déchets de champignons	35	2,1	traces	0,63	0,75	1,25
Biosolides traités	biosolides en granulés	92	4,7	0,13	1,1-1,6	4,2	0,2
	LysteGro	12-15	5,6	2,9	0,35	5,25	2,25
	N-Viro	75	0,74	0,03	0,75	1,0	4,25

Les matières de source non agricole ont une qualité et une teneur en éléments nutritifs qui leur sont propres et qui doivent être évaluées au cas par cas. Les producteurs sont tenus d'échantillonner et de faire analyser périodiquement les matières qu'ils produisent. Cette information doit servir à déterminer les taux d'épandage qui répondront avec précision aux besoins des cultures.

Biosolides

Les biosolides d'épuration arrivent à l'usine de traitement sous la forme d'une matière liquide extrêmement diluée, puisque de l'eau sert de support pour transporter ces matières à l'usine. Avant les exigences de planification en matière de gestion des éléments nutritifs pour l'épandage au sol de biosolides, les biosolides d'épuration pouvaient contenir des quantités importantes de contaminants si le système collectait les eaux usées de sources industrielles ou domestiques. Les règlements sur l'évacuation des eaux usées de la plupart des collectivités restreignent désormais la quantité de ces contaminants à des concentrations très faibles, de sorte que les biosolides qui sortent des usines de traitement respectent les critères énoncés dans un plan de gestion des matières de source non agricole (MSNA).

Durant le procédé de traitement, les solides sont concentrés et les phosphates sont précipités hors de l'eau sous des formes insolubles, tandis que le gros du potassium demeure en solution et n'est pas conservé. À la fin du procédé, les biosolides renferment à la fois de l'azote organique et de l'azote ammoniacal en plus d'une quantité appréciable de phosphore. La biodisponibilité de ce phosphore pour les végétaux peut varier selon le procédé de traitement utilisé. Ces biosolides peuvent subir un traitement supplémentaire avant l'épandage au sol, ce qui peut modifier grandement la quantité et la biodisponibilité des éléments nutritifs.

Matières de source non agricole supplémentaires

D'autres matières de sources industrielles ou municipales peuvent se prêter à des épandages au sol. Elles peuvent varier grandement en fonction de la source de la matière et du traitement qu'elle a subi.

Les biosolides de papeterie renferment surtout des composés carbonés, auxquels s'ajoutent des concentrations relativement faibles d'éléments nutritifs. Les composts de résidus de jardin auront des teneurs en azote, phosphore et potassium qui varieront grandement, selon la source de matière première. Il faut évaluer ces matières au cas par cas si elles doivent servir de source d'éléments nutritifs. Le tableau 6–7 donne la valeur type de certaines matières de source non agricole.

Les différents types de fumier et les différents biosolides ont des caractéristiques physiques et chimiques qui se recoupent. Cela signifie qu'il faut gérer de la même manière les éléments nutritifs contenus dans ces matières et que la méthode de gestion dépendra davantage des caractéristiques inhérentes à la matière qu'à sa provenance.

Toutefois, les matières de source non agricole (MSNA) sont soumises à des règles supplémentaires qui visent à garantir que leur épandage soit fait de manière à profiter aux cultures.

Facteurs influençant la biodisponibilité des éléments nutritifs

Azote

Les cultures prélèvent l'azote dans ses formes minérales, comme azote des nitrates (NO_3^-) ou ammoniacal (NO_4^+). Cela signifie que la portion d'ammonium du fumier est immédiatement assimilable par la culture, alors que l'azote organique doit être minéralisé avant de pouvoir être utilisé. Pour que les éléments nutritifs présents dans le fumier soient utilisés au mieux, il faut qu'ils soient assimilables à l'endroit et au moment où la culture peut les utiliser, un objectif qui n'est pas toujours facile et parfois même impossible à atteindre avec les options de gestion du fumier actuelles.

Volatilisation de l'ammoniac

L'azote ammoniacal peut être facilement converti en gaz ammoniac quand le fumier est exposé à l'air, ce qui fait perdre au fumier une grande quantité de l'azote assimilable qu'il renferme. Voici certaines conditions qui favorisent une perte rapide d'azote ammoniacal de la surface du sol : une concentration élevée d'ammonium dans le fumier, un pH élevé du fumier, des températures chaudes, des sols secs et des conditions venteuses. Le couvert ou les résidus des cultures ont un effet non uniforme sur la volatilisation de l'ammoniac. Ils peuvent réduire la quantité de perte qui survient lorsque le fumier est placé sous le couvert, mais peuvent en fait augmenter la perte découlant de l'épandage de fumier sur le couvert en raison de l'accroissement de l'aire superficielle. L'incorporation du fumier est un moyen efficace de freiner la volatilisation de l'ammoniac, étant donné que l'ammoniac libéré est rapidement absorbé dans l'eau du sol et adsorbé sur les surfaces des particules d'argile.

Minéralisation

L'azote organique contenu dans le fumier doit être converti en ammonium avant de pouvoir être assimilé par les végétaux. Cette conversion est réalisée par les microbes qui se nourrissent des composés organiques et rejettent de l'ammonium comme un déchet. Par conséquent, la vitesse de minéralisation s'accroît lorsque les conditions sont favorables à l'activité microbienne. La nature de la matière organique contenue dans le fumier influence aussi la vitesse de minéralisation. Le fumier solide épandu à la fin de l'été ou au début de l'automne aura une concentration plus élevée d'azote minéralisé assimilable par la culture suivante comparativement au même fumier épandu au printemps. Dans le cas du fumier épandu au printemps, environ 20 % de l'azote organique

provenant du fumier de ruminants serait biodisponible au cours de la première saison suivant l'épandage, pourcentage qui monte à 30 % avec du fumier de volaille.

La minéralisation ralentit quand les conditions de sol sont fraîches. Ce ralentissement peut aller jusqu'à provoquer des carences temporaires en azote les printemps frais, dans les cultures semées dans des champs où du fumier a été épandu. Un épandage de démarrage d'azote peut aider à contrer ce phénomène.

Immobilisation

Lorsque des matières riches en carbone (comme du fumier avec un volume élevé de paille, ou des biosolides primaires provenant de fabriques de papier) sont ajoutées dans le sol, l'azote du sol peut être immobilisé par les microbes pendant qu'ils dégradent les composés carbonés (consultez le *Ratio carbone:azote [C:N]* ci-dessous et le tableau 6–8). Cela peut réduire la biodisponibilité de l'azote pour les cultures si ces matières sont épandues avant les semis. Ces matières peuvent potentiellement servir à fixer l'azote du sol à l'automne afin de réduire les pertes dues au ruissellement au cours de l'hiver, mais leur efficacité n'a pas été prouvée.

Ratio carbone:azote (C:N)

Le ratio C:N est l'équilibre entre la quantité de carbone dans une matière organique et la quantité d'azote. Le carbone est un constituant de composés organiques comme la cellulose, la lignine et les protéines, qui sont des sources alimentaires pour les microorganismes terricoles. Les microorganismes ont besoin d'azote au fur et à mesure qu'ils se multiplient pour tirer parti de la réserve d'aliments accrue à leur disposition. Si la matière organique ne renferme pas suffisamment d'azote, ils absorberont l'azote du sol pour répondre à leurs besoins. Cet azote immobilisé sera par la suite rejeté une fois que le carbone excédentaire aura été utilisé et que la population microbienne commencera à diminuer.

En principe, on assiste à la minéralisation lorsque le ratio C:N de la matière organique est inférieur à 25:1, et à l'immobilisation de l'azote quand le ratio est supérieur à 25:1. Par ailleurs, l'équilibre entre minéralisation et immobilisation dépend des conditions de température et d'humidité ainsi que de la nature de la matière organique.

Tableau 6–8. Ratios C:N typiques de certaines matières communes

Matière	Ratio C:N
microorganismes terricoles	7-9:1
matière organique du sol	10-12:1
luzerne	13:1
seigle d'automne :	
végétatif	14:1
floraison	20:1
maturité	80:1
paille de céréales	80:1
rafles de maïs	60:1
bran de scie	200-400:1
biosolides de papeterie :	
primaires	80-100:1
secondaires	7-10:1
drêches de distillerie	9:1
fumier solide de bovins	15-30:1
fumier solide de volaille	5-10:1
fumier composté	10-40:1
compost de résidus de jardin	15-40:1
compost de déchets de champignons	15-30:1

Phosphore

Formes dans le fumier

Le gros du phosphore présent dans le fumier est associé à la fraction solide du fumier et se trouve sous la forme d'orthophosphate (PO_4^{3-}) ou en composés organiques dégradables facilement. Cela signifie que sur le plan chimique, le phosphore contenu dans le fumier n'est pas très différent du phosphore contenu dans les engrais. La proportion des différentes formes de P est déterminée par les espèces de bétail, leur âge, leur ration et leur type de litière, ainsi que par la méthode de stockage du fumier. En Ontario, la biodisponibilité du fumier de P varie de 40 à 80 % de celle d'un engrais de P. Cependant, la température, l'humidité du sol et le pH du sol ont un effet sur la vitesse de minéralisation du P, de façon telle que seulement 40 % du fumier de P est présumé être assimilable dans l'année de l'épandage.

Une fraction du phosphore inorganique dans le fumier est soluble dans l'eau, ce qui le rend mobile et susceptible de ruisseler avec l'eau de surface. Cette fraction est mesurée comme le phosphore extractible à l'état humide et variera en fonction du régime. Elle peut aussi être reliée à la quantité de phytase dans le système digestif du bétail. Les bovins produisent suffisamment de phytase naturellement, alors que les porcs et la volaille en produisent très peu et peuvent être nourris avec un régime auquel l'enzyme est ajoutée.

Des études menées dans des serres montrent que, lorsque des quantités égales de phosphore provenant de fumier liquide de porcs et d'engrais sont mélangées également avec le sol, il en découle un prélèvement égal par les végétaux. La différence dans la biodisponibilité apparente du phosphore pourrait s'expliquer par la difficulté à disposer le fumier dans une bande à proximité de la semence en vue d'une biodisponibilité maximale et la difficulté à maintenir des taux d'épandage uniformes à la grandeur du champ.

Contribution aux niveaux de fertilité des sols

L'analyse régulière du sol est la meilleure façon de faire le suivi de l'accumulation du phosphore dans chaque champ. En Ontario, dans les plans de gestion des éléments nutritifs, on considère que 80 % de la teneur du fumier en P total contribuent à la fertilité des sols. On présume que le 20 % qui reste est fixé aux particules de sol ou déplacé du champ par l'écoulement de surface ou l'érosion du sol.

Traitement pour réduire la biodisponibilité du phosphore

Plusieurs biosolides municipaux sont traités avec de l'alun, du sulfate de fer ou de la chaux durant le procédé de traitement secondaire afin de débarrasser l'effluent

du phosphate. Certains éleveurs de volaille ont recours à un traitement semblable. Cela entraîne la fixation d'une grande proportion du P en aluminium insoluble, phosphates de fer ou de calcium, ce qui peut réduire de beaucoup la biodisponibilité de ces matières à court et à long terme. L'analyse des tissus lors de la pollinisation des végétaux indiquera le prélèvement d'éléments nutritifs par les végétaux lorsque ces matières sont utilisées.

Potassium

La plus grande partie du potassium dans le fumier est associée à la portion liquide, et essentiellement tout le potassium dans le fumier est sous des formes solubles et assimilables par les cultures. Dans le cas du fumier solide, les pertes peuvent survenir au moment du stockage si l'écoulement n'est pas contenu. Par le passé, de fortes concentrations de fumier dans des exploitations laitières ont entraîné des prélèvements excessifs de K par la luzerne et des déséquilibres des minéraux dans l'alimentation des vaches tarées appartenant aux races laitières. Au cours des dernières années, les concentrations de K dans plusieurs champs de cultures fourragères ont cependant diminué à des concentrations où la survie hivernale pourrait être concernée. Les biosolides d'épuration renferment très peu de potassium, celui-ci n'étant pas conservé par les matières sèches durant le traitement.

Les concentrations de phosphore et de potassium dans le fumier varient considérablement d'une exploitation à l'autre. Les analyses de laboratoire constituent le meilleur moyen de s'en faire une idée.

Éléments nutritifs secondaires et oligo-éléments

En plus du trio N, P et K et de la matière organique, le fumier renferme des quantités significatives de calcium, de magnésium, de soufre élémentaire et d'oligo-éléments. Les carences de ces éléments sont plutôt rares dans les exploitations qui font des épandages de fumier de bétail périodiques.

Les solutions nutritives de serre et les matières de source non agricoles (MSNA), notamment les biosolides d'épuration, contiennent aussi des oligo-éléments. Les concentrations dépendront souvent du type d'installation ou du mélange de contributeurs résidentiels, institutionnels et industriels au système. Les oligo-minéraux (métaux lourds incluant l'arsenic, le cadmium, le cobalt, le chrome, le cuivre, le mercure, le molybdène, le nickel, le plomb, le sélénium et le zinc), certains oligo-éléments et le sodium sont réglementés en vertu de la *Loi de 2002 sur la gestion des éléments nutritifs*. Les concentrations de ces éléments sont limitées dans les biosolides, et si les lignes directrices ne sont pas respectées, la matière ne peut pas être épandue au sol. La plupart des types de fumier contiennent peu de ces éléments, à moins que ceux-ci aient été ajoutés aux aliments pour animaux pour réduire la consommation d'antibiotiques (p. ex. cuivre ou zinc). Le taux ou la fréquence d'épandage du fumier peut devoir être limité pour ces fumiers particuliers.

Prévision de la biodisponibilité des éléments nutritifs dans les matières épandues

Pour optimiser l'utilisation des éléments nutritifs dans les matières organiques, il faut connaître la quantité d'éléments nutritifs qui se retrouve dans la matière épandue et la proportion qui sera assimilable par la culture. Puisque les calibrages de la réponse des éléments nutritifs ont été faits avec des engrais minéraux, la biodisponibilité des éléments nutritifs de sources organiques est souvent exprimée par rapport à l'engrais.

Les tableaux qui présentent les valeurs nutritives moyennes pour différents types de fumier et de biosolides, comme ceux qui se trouvent dans le présent chapitre, sont de bons outils de planification. Cependant, étant donné la variabilité des sources d'éléments nutritifs, l'analyse de la matière donnera de meilleures informations si l'échantillon prélevé est représentatif de la matière qui sera épandue au sol.

Interprétation des résultats d'analyses du fumier

Les résultats d'une analyse du fumier doivent être lus attentivement, puisque les résultats peuvent être exprimés de différentes manières. Les résultats d'analyse peuvent être exprimés sous la forme de pourcentage de matière sèche dans le fumier ou comme pourcentage du poids frais (humide). Ils peuvent également avoir été convertis en une valeur de remplacement des engrais, sur la foi de l'information fournie au moment du dépôt de l'échantillon.

L'encadré ci-dessous présente les formules pour calculer le phosphore et le potassium biodisponibles et les conversions des pourcentages en unités de poids les plus fréquemment utilisées.

Calculer le phosphore et le potassium assimilables dans le fumier

Conversion du P total en P₂O₅ assimilable

% de P x 2,29 = % de P₂O₅ total

% de P₂O₅ total x 0,40 = % de P₂O₅ assimilable l'année de l'épandage

% de P₂O₅ total x 0,80 = % de P₂O₅ assimilable pour l'accumulation dans le sol

Conversion du K total en K₂O assimilable

% de K x 1,20 = % de K₂O total

% de K₂O total x 0,90 = % de K₂O assimilable

La plupart des laboratoires de l'Ontario déclarent la quantité de P₂O₅ et de K₂O assimilable provenant du fumier, mais à l'occasion, un échantillon peut être déclaré comme % de P et % de K. Dans une telle éventualité, vous devrez convertir les coefficients pour exprimer les résultats avec les unités utilisées dans les recommandations de fertilisation.

Conversion du pourcentage en unités de poids

Conversion du % d'éléments nutritifs assimilables en unités de poids

% d'éléments nutritifs assimilables x 10 = kg/t

% d'éléments nutritifs assimilables x 20 = lb/t imp.

% d'éléments nutritifs assimilables x 10 = kg/1 000 L = kg/m³

% d'éléments nutritifs assimilables x 100 = lb/1 000 gal imp.

Azote total, ammoniacal et organique

Dans la plupart des matières organiques, l'azote se présente sous forme d'azote ammoniacal et sous forme d'azote organique, de sorte que l'azote total s'entend de la somme des deux formes. Les laboratoires mesurent l'azote total et l'azote ammoniacal, la quantité d'azote organique étant déduite au moyen d'une soustraction.

Les solutions nutritives de serre et certaines matières compostées peuvent contenir une quantité appréciable d'azote des nitrates. Vérifiez auprès du laboratoire si le forfait d'analyse du compost comprend tous les aspects pertinents à la biodisponibilité de l'azote : azote des nitrates, azote ammoniacal, azote total et ratio C:N.

Des estimations de l'azote assimilable provenant du fumier peuvent être faites sous forme de proportion de l'azote total, ce qui présuppose que le fumier et la gestion de l'épandage sont « dans la moyenne ». Il s'agit d'un bon outil général pour planifier la distribution du fumier entre différents champs. Des évaluations plus précises de l'azote biodisponible dans le fumier peuvent être faites après l'épandage, une fois que les données sur le moment de l'application, les conditions météorologiques au moment de l'épandage et après, et le laps de temps écoulé avant l'incorporation sont connues. L'utilisation des unités réelles d'azote ammoniacal et d'azote organique révélées par l'analyse du fumier peut aussi donner des estimations plus précises.

Effets du moment et de la méthode d'épandage

Le moment et la méthode d'épandage ont un grand effet sur l'assimilation de l'azote, et beaucoup moins sur celle du phosphore et du potassium. Les sources de fumier devraient combler au plus de deux tiers à trois quarts des besoins en azote d'une culture de maïs afin d'éviter l'épandage excessif de phosphore et de garantir l'assimilation de N par la culture lorsque la minéralisation est lente ou retardée par des conditions fraîches. Comme l'azote minéral et l'azote organique sont présents en proportions variables dans la matière organique, les répercussions du moment et de la méthode d'épandage ne sont pas les mêmes pour toutes les matières. La figure 6–1 présente les voies et les quantités relatives de prélèvement et de perte, en fonction de la source de fumier et du moment et de la méthode d'épandage.

La volatilisation de l'ammoniac entraîne une perte immédiate de N assimilable. La quantité perdue varie en fonction du temps entre l'épandage et l'incorporation et des conditions existantes au moment de l'épandage. L'azote ammoniacal qui est retenu dans le sol peut encore être perdu suite à la conversion en nitrate, que ce soit par lessivage ou par dénitrification. La matière organique riche en azote ammoniacal est celle qui procure la plus grande quantité d'azote aux cultures pourvu qu'elle soit épandue le plus près possible du moment où l'azote peut être prélevé par les cultures.

L'azote contenu dans le fumier se présente dans des proportions variables, sous forme minérale et sous forme organique. Une partie de l'azote se perd dans l'air ou dans l'eau, une partie demeure sous forme organique, le reste étant assimilable par les cultures (consultez la figure 6–1).

L'azote organique ne devient assimilable par les cultures qu'une fois converti en azote ammoniacal par suite de sa minéralisation. Cette conversion est lente quand les sols sont froids. Les matières qui contiennent davantage d'azote organique (p. ex., fumier solide de bovin ou de bovins laitiers) présenteront une moins grande différence dans l'assimilation de l'azote entre un épandage automnal et printanier, puisque la perte d'azote minéral est compensée par une plus grande assimilation de la fraction organique. Lorsque du fumier solide avec beaucoup d'azote organique et très peu d'azote ammoniacal est épandu à la fin de l'été (par exemple après la récolte des céréales), l'azote biodisponible pour la culture suivante est maximisé. Si les mêmes matières sont épandues au début du printemps et incorporées dans le sol, l'azote ammoniacal est conservé et il y a suffisamment de temps pour la minéralisation, mais souvent pas assez de temps pour répondre aux besoins en azote du maïs-grain. Épandre la même matière en fin d'automne peut procurer le même avantage, car le sol est alors suffisamment froid pour freiner la nitrification. Le risque, avec les épandages de fin de saison, est lié à la variabilité des conditions météorologiques automnales et hivernales.

En raison de la proportion plus grande d'azote ammoniacal par rapport à l'azote organique dans le fumier liquide, l'épandage automnal entraîne des pertes supérieures, notamment par lessivage, que l'épandage printanier. L'épandage en surface hausse la quantité d'azote ammoniacal perdu par volatilisation. L'injection printanière de fumier liquide maximise l'assimilation de l'azote par les végétaux, puisque cela correspond mieux à la période où la culture en a besoin, et minimise le risque de perte d'azote par volatilisation ou par lessivage (figure 6–1).

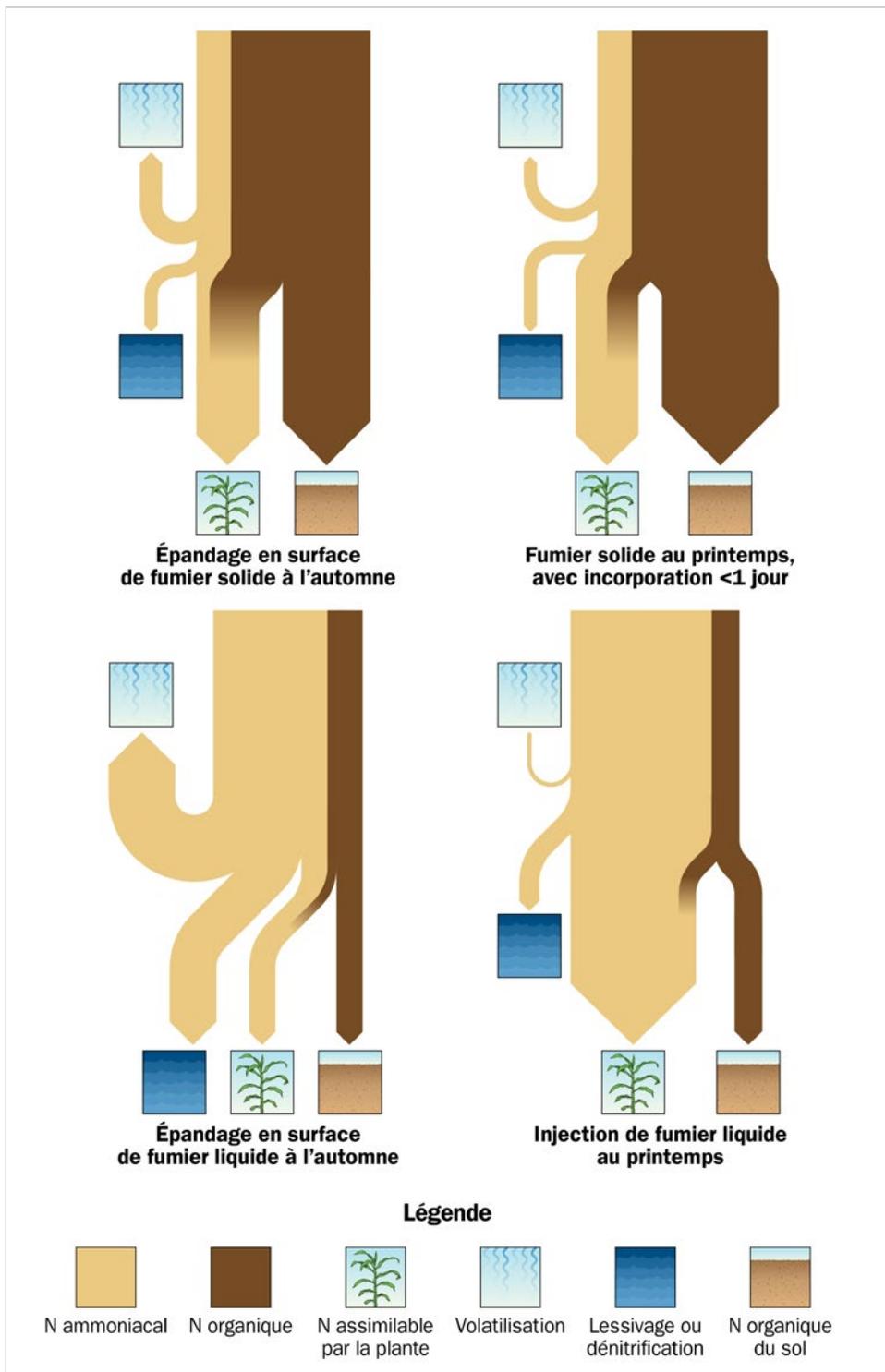


Figure 6-1. Effet du type de fumier et de la méthode d'épandage sur le devenir de l'azote du fumier

Effets des systèmes de traitement tels que compostage ou digestion anaérobie

Les systèmes de traitement modifient la forme de l'azote dans la matière et peuvent également réduire considérablement la concentration d'azote dans celle-ci. L'échantillonnage et l'analyse sont très importants pour connaître la valeur de la matière traitée et décider de sa gestion.

Le compostage est un procédé aérobie qui vise à convertir le plus possible de l'azote contenu dans la matière en une forme organique. Il oblige à ajouter au fumier ou aux biosolides des matières affichant un ratio C:N élevé, puis à créer des conditions propices à la prolifération bactérienne. Dans un système de compostage bien géré, les microbes prélèvent l'essentiel de l'azote pendant qu'ils se nourrissent de la matière riche en carbone. Si le compost est mal géré, jusqu'à la moitié de l'azote total peut être perdu par volatilisation. Au terme du compostage, ce n'est pas tout l'azote qui s'est lié à des composés organiques. Du fait des conditions aérobies, l'azote minéral qui subsiste se trouve essentiellement sous forme d'azote des nitrates. Quand le compost est épandu à la surface du sol, les pertes d'azote par volatilisation sont négligeables, mais la biodisponibilité de l'azote organique est liée aux conditions qui favorisent la minéralisation.

On a recours à la digestion anaérobie pour réduire les odeurs et la charge pathogène des matières organiques, ainsi que pour produire du gaz méthane qui peut être utilisé pour le chauffage ou pour produire de l'électricité. Le produit final a perdu beaucoup de la matière organique facilement dégradable et possède une plus grande proportion d'azote dans la forme ammoniacale que la matière originale. Cela augmente la

biodisponibilité immédiate de l'azote de la matière digérée, mais entraîne la nécessité d'une incorporation rapide. Les pertes par volatilisation de l'épandage en surface de cette matière seront généralement plus importantes que celles de matières non digérées.

Calcul de l'azote biodisponible de sources organiques

Pour la planification générale, la biodisponibilité de l'azote provenant de matières organiques peut être estimée à partir d'un tableau de valeurs. Pour peaufiner les taux d'épandage d'engrais, une estimation plus précise est cependant souhaitable. Cela nécessite d'estimer la rétention d'azote ammoniacal dans le fumier, la minéralisation du bassin d'azote organique et les pertes par le sol entre l'épandage du fumier et le prélèvement par la culture. Vous trouverez plus bas un exemple de calcul de l'azote biodisponible provenant d'une source d'éléments nutritifs organiques.

Calcul de l'azote total (NT)

$$\begin{aligned} \text{Azote total} &= \text{azote organique} + \text{Azote ammoniacal (NH}_4\text{-N)} + \text{Azote des nitrates (NO}_3\text{-N)} \\ &= (\text{NT} - \text{NH}_4 - \text{NO}_3) + \text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N} \end{aligned}$$

Calcul de l'azote biodisponible pour les végétaux

$$\begin{aligned} \text{Azote biodisponible} &= (\text{NT} - \text{NH}_4 - \text{NO}_3) + \text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N} \\ \text{pour les végétaux} &\times \text{facteur de biodisponibilité} \quad \times \text{facteur de biodisponibilité} \quad \times \text{facteur de biodisponibilité} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Azote biodisponible} &= (\text{NT} - \text{NH}_4 - \text{NO}_3) + \text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N} \\ \text{pour les végétaux} &\times \text{tableau A} \quad \times \text{tableau B} \quad \times \text{tableau C} \\ \text{au printemps} & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Azote biodisponible} &= (\text{NT} - \text{NO}_3) + \text{NO}_3\text{-N} \\ \text{pour les végétaux à} &\times \text{tableau C} \quad \times \text{tableau D} \\ \text{l'automne} & \end{aligned}$$

Tableau A : Pourcentage estimé d'azote organique assimilable dans l'année d'épandage (tel qu'épandu)

$$\begin{aligned} \% \text{ N organique} &= \% \text{ N total} - \% \text{ NH}_4\text{-N} \\ (\text{ppm NH}_4\text{-N}/10\,000 &= \% \text{ NH}_4\text{-N}) \end{aligned}$$

Liquide

$$[\% \text{ N organique} - (\% \text{ MS} \div 50,93)]$$

$$\times 100 = \text{lb}/1\,000 \text{ gal}$$

$$\times 10 = \text{kg}/1\,000 \text{ L ou kg}/\text{m}^3$$

Exemple : Fumier liquide de bovins laitiers
(4,5% MS, 0,25 % N total, 0,12 % NH₄-N,
0,04 % P, 0,19 % K)

N organique biodisponible

$$= [(0,25 - 0,12) - (4,5 \div 50,93)]$$

$$= (0,13 - 0,09)$$

$$= 0,04 \%$$

$$0,04 \% \times 100 = 4 \text{ lb}/1\,000 \text{ gal}$$

$$0,04 \% \times 10 = 0,4 \text{ kg}/\text{m}^3$$

Solide

$$[\% \text{ N organique} - (\% \text{ MS} \div 61,44)]$$

$$\times 20 = \text{lb}/\text{t imp.}$$

$$\times 10 = \text{kg}/\text{tonne}$$

Exemple : Fumier solide de poulet à griller
(70 % MS, 3,12 % N total, 0,6 % NH₄-N,
1,4 % P, 1,8 % K)

N organique biodisponible

$$= [(3,12 - 0,6) - (70 \div 61,44)]$$

$$= (2,52 - 1,14)$$

$$= 1,38 \%$$

$$1,38 \% \times 20 = 27,6 \text{ lb}/\text{t imp.}$$

$$1,38 \% \times 10 = 13,8 \text{ kg}/\text{T}$$

Adapté par K. Reid de J. Lauzon et K. Janovicek, Université de Guelph, 2013. Ce tableau est basé sur une évaluation de données provenant de 180 champs qui mesuraient le rendement des cultures en réaction à l'épandage de fumier.

Logique derrière les équations: N organique du fumier biodisponible = N organique x (teneur en carbone du fumier x carbone conservé par la vie du sol x ratio C:N de la vie du sol) x facteur de conversion (% en lb par tonne impériale ou par 1 000 gal)

Hypothèses :

- N organique (%) = N total (%) - N ammoniacal (%)
- La teneur en carbone moyenne du fumier est de 42 % de la matière sèche du fumier
- Le carbone retenu est de 37,4 % pour le fumier liquide et de 31 % pour le fumier solide
- Le ratio C:N de la vie du sol est de 8:1

Tableau B : Proportion estimée de l'azote ammoniacal provenant du fumier retenue dans l'année d'épandage (épandage au printemps)

	Injection (couvert)	Incorporation					Absence d'incorporation		
		1 jour	2 jours	3 jours	4 jours	5 jours	Sol nu	Résidu	Culture sur pied (sous le couvert)
moyenne (facteur)	1,00	0,75	0,60	0,50	0,45	0,40	0,35	0,50	0,66
temps frais (< 10 °C)	1,00	0,85	0,70	0,60	0,55	0,50	0,45	0,66	0,75
temps chaud (> 25 °C)	1,00	0,65	0,50	0,40	0,35	0,30	0,20	0,35	0,55

Adapté de J. Lauzon et K. Janovicek, Université de Guelph, 2013. Ce tableau est basé sur une évaluation de données provenant de 180 champs qui mesuraient le rendement des cultures en réaction à l'épandage de fumier.

Tableau C : Proportion estimée de l'azote assimilable provenant de fumier épandu à la fin de l'été ou à l'automne, comme proportion (facteur) de l'azote total épandu

Forme du fumier	Type de fumier	Azote assimilable ^{1,2}				
		Incorporation (<24 hr)			Absence d'incorporation	
		Fin de l'été	Début de l'automne	Fin de l'automne	Début de l'automne	Fin de l'automne
solide	bovin/mouton/cheval solide	0,21	0,31	0,34	0,21	0,21
	porc/compost solide ³	0,30	0,40	0,45	0,40	0,45
	volaille/vison solide	0,41	0,53	0,61	0,37	0,32
liquide	bovin liquide	0,25	0,27	0,31	0,24	0,24
	porc liquide	0,22	0,38	0,47	0,25	0,25
	volaille/vison liquide ³	0,26	0,33	0,51	0,26	0,39
	biosolides liquides	0,33	0,37	0,42	0,34	0,36

N assimilable dans le fumier = N total (tiré de l'analyse) × N assimilable (facteur du tableau)

¹ Suppose une culture après toute une saison, plantée au printemps (p. ex. du maïs).

² Tient compte de la perte d'ammoniac dans l'atmosphère et de la minéralisation de l'azote organique.

³ Ces coefficients sont basés sur l'assimilation présumée de l'azote étant donné les caractéristiques de chaque type de fumier, puisqu'il n'y a aucune mesure directe de l'assimilation de l'azote pour ces matières.

Adapté de J. Lauzon et K. Janovicek, Université de Guelph, 2013. Ce tableau est basé sur une évaluation de données provenant de 180 champs qui mesuraient le rendement des cultures en réaction à l'épandage de fumier.

Tableau D : Pourcentage estimé de l'azote des nitrates assimilable dans l'année d'épandage (toutes les saisons)

LÉGENDE : Fin de l'été = jusqu'au 20 sept., début de l'automne = du 21 sept. au 9 nov., fin de l'automne = du 10 nov. à l'hiver

	Incorporation (dans les 24 h)					Absence d'incorporation				
	Fin de l'été	Début de l'automne	Fin de l'automne	Présemis ¹	Épandage en bandes latérales ⁴	Fin de l'été/début de l'automne	Fin de l'automne	Sol nu	Résidu	Épandage en bandes latérales
Rétention de l'azote des nitrates	0,1	0,2	0,5	0,95	1,0	0,1	0,40	0,85	0,75	0,85

Source : Adapté de Barry, Beauchamp et coll., Université de Guelph, 2000

¹ Présume une culture semée au printemps; l'épandage en bandes latérales renvoie à l'épandage sur une culture en croissance.

Azote assimilable provenant de précédents épandages de fumier

La plus grande partie de l'azote (minéral) assimilable dans le fumier est utilisée par la culture ou perdue pendant la première saison de croissance suivant l'épandage. Le reste de l'azote, l'azote organique, devient assimilable en quantités faibles et décroissantes les années suivantes. On considère généralement que l'azote organique provenant d'épandages est assimilable à 10 % après un an, à 5 % après deux ans et à 2 % après trois ans. Compte tenu de ces pourcentages, un seul épandage de fumier ne devrait pas influencer pour la peine les recommandations visant les apports d'azote. Toutefois, si un même champ fait l'objet d'épandages répétés de fumier solide, on peut s'attendre à une concentration importante d'azote résiduel.

Calibrage du matériel d'épandage

Le calibrage du matériel d'épandage est essentiel pour garantir la précision de la dose et l'uniformité de l'épandage. Plusieurs méthodes permettent de mesurer les taux d'épandage.

Pour les matières solides :

- Méthode A : Utiliser un épandeur avec une cellule de mesure ou peser une charge et mesurer l'aire qu'elle couvre.
- Méthode B : Étendre un sac de plastique d'un mètre carré sur le sol et y épandre du fumier solide comme on le ferait dans un champ. Peser le fumier (moins le poids du plastique) et trouver le facteur d'équivalence dans le tableau 6–9.

Afin de déterminer l'uniformité de l'épandage, peser le fumier de la manière décrite ci-dessus dans plusieurs zones du champ. L'épandage simultané et le début des épandages de charge par rapport à la fin, présentent souvent des volumes différents, comme le font les zones où l'épandage se chevauche.

Tableau 6–9. Calibrage de l'épandage de fumier solide sur une feuille de 1 m x 1 m (40 po x 40 po)

Poids/feuille		Dose	
kg	lb	t/ha	t imp./acre
0,5	1	3,6	1,6
1	2	7,2	3,2
1,5	3	10,8	4,8
2	4	14,3	6,4
2,5	5	17,9	8,0
3	7	25,1	11,2
5	10	35,8	16,0
7,5	15	53,8	24,0

Estimer la dose de fumier solide épandue par volume d'épandeur n'est pas recommandé en raison de la variation de la densité apparente du fumier (consultez le tableau 6–10, *Densités du fumier*) et du degré de tassement de l'épandeur.

Tableau 6–10. Densités du fumier

Type de fumier	kg/m ³	lb/pi ³	lb/bu
Liquide	1 000	62,4	80
Semi-solide	960	60	76
Solide épais	800	50	64
Solide léger	560	35	45

Pour les matières liquides :

L'utilisation de débitmètres et d'un appareil GPS aide au calibrage et à la consignation des doses d'épandage du fumier. Lorsque ce matériel n'est pas disponible, la dose d'épandage peut être déterminée en divisant le volume de la citerne par la superficie couverte par l'épandage du fumier d'une citerne.

La superficie couverte par l'épandage du fumier d'une citerne peut être calculée de deux manières :

- Méthode A : à partir de la largeur du travail, de la vitesse d'avancement et du temps nécessaire pour vider la citerne.
- Méthode B : en plaçant une série de contenants à parois verticales (p. ex. des seaux) sur le sol que vous comptez couvrir. Épandez le fumier puis mesurez l'épaisseur de fumier dans le contenant et déterminez la dose d'épandage à partir du tableau 6–11.

Pour les matières solides et liquides, prendre en compte le chevauchement, en particulier pour les matières contenant peu de matière sèche ou les systèmes d'irrigation des éléments nutritifs de l'eau d'alimentation de serres.

Tableau 6–11. Calibrage du dosage de fumier liquide à l'aide d'un seau à parois verticales

Profondeur de fumier		Dose	
mm	po	L/ha	gal/acre
2,5	¼	25 000	2 265
3,1	⅜	31 000	2 825
6,3	½	63 000	5 650
9,4	¾	94 000	8 500
12,5	1	125 000	11 325
15,6	1 ¼	156 000	14 150
18,8	1 ½	188 000	17 000
25	2	250 000	22 650

Planification de la gestion des éléments nutritifs

La planification de la gestion des éléments nutritifs consiste à jumeler les besoins de la culture et les éléments nutritifs assimilables dans le sol avec les éléments nutritifs assimilables dans le fumier ou d'autres sources organiques, puis à équilibrer toute éventuelle carence avec un engrais minéral. Plusieurs collectivités publiques, y compris l'Ontario, ont des exigences légales en matière de planification de la gestion des

éléments nutritifs. Même s'il s'agit d'une exigence réglementaire pour certaines exploitations, la planification a l'avantage de permettre à toute ferme de faire un usage optimal des éléments nutritifs.

Équilibre des éléments nutritifs à l'échelle de l'exploitation : où se situe l'Ontario?

Certains critiques prétendent que l'intensification de l'agriculture entraînera inévitablement des excès d'éléments nutritifs et un épandage excessif de fumier. Comme justification, ils mentionnent le cas de la Caroline du Nord et du Delaware, où des régions de ces États ont étendu la production de bétail et de volaille au-delà de la capacité de la superficie cultivable d'absorber les éléments nutritifs. Il en est résulté une dégradation marquée de la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines ainsi que des plaintes au sujet des odeurs et de la piètre qualité de l'air.

La situation est très différente en Ontario. En 2002, compte tenu de l'ensemble des superficies cultivées de l'État, le nombre d'unités nutritives par hectare s'établissait à près de 1 dans l'État du Delaware et à 1,25 en Caroline du Nord. En revanche, dans le Recensement de l'agriculture de 2001, le nombre d'unités nutritives par hectare s'établissait à 0,65 en Ontario. (Pour l'ensemble du Canada, le chiffre était de 0,43 unités nutritives par hectare.) Une unité nutritive représente le nombre d'animaux d'élevage qui produisent la moindre des quantités entre 43 kg d'azote ou 55 kg de phosphate (valeur de remplacement des engrais), et sert à comparer différents animaux d'élevage sur une base nutritive égale.

Il existe évidemment des zones circonscrites où la production d'éléments nutritifs est excédentaire, mais le problème tient davantage à la distribution de ces éléments nutritifs qu'à une surproduction.

Défis inhérents à différentes intensités d'élevage

Les fermes d'élevage se divisent grosso modo en trois catégories selon l'intensité de leur production. Chaque catégorie est confrontée à différents défis en matière de gestion des éléments nutritifs.

Les membres du premier groupe sont très intensifs, avec une proportion importante du régime des animaux qui provient d'aliments pour animaux achetés plutôt que cultivés à la ferme. Cela entraîne un surplus d'éléments nutritifs dans l'exploitation agricole par rapport à ce qui est vendu comme viande, œufs et lait. Ces exploitations sont confrontées au défi d'exporter du fumier vers d'autres exploitations ou d'avoir une accumulation d'éléments nutritifs dans leurs sols découlant de l'épandage excessif de fumier.

Le second groupe représente les exploitations où les apports d'éléments nutritifs provenant des aliments et des engrais sont très proches de l'équilibre avec leurs exportations de viande, d'œufs et de lait. La plupart des aliments pour animaux sont cultivés à la ferme et le fumier est retourné à la superficie cultivée. Pour ces fermes, le défi consiste à répartir le fumier convenablement entre les champs disponibles. La plupart de ces exploitations doivent quand même recourir à des engrais minéraux pour équilibrer les éléments nutritifs fournis par le fumier.

La troisième catégorie réunit les fermes qui se caractérisent par une intensité d'élevage très faible et qui sont loin de produire suffisamment de fumier pour répondre aux besoins de leurs cultures. Si ces fermes n'épandent pas d'éléments nutritifs sous la forme d'engrais minéraux ou de sources externes d'éléments nutritifs organiques, tels que du compost ou des biosolides, leur productivité baissera graduellement au fur et à mesure que les éléments nutritifs sortiront de l'exploitation.

Optimisation du fumier comme source d'éléments nutritifs

L'emploi du fumier comme engrais se heurte parfois à des réticences engendrées par l'incertitude quant à sa teneur en éléments nutritifs, à la biodisponibilité de ces éléments nutritifs et aux quantités de fumier réellement épandues dans le champ. Une approche systématique à l'utilisation du fumier peut éliminer une bonne part de cette incertitude.

Les épandages de fumier devraient viser à combler jusqu'aux trois quarts environ des besoins en azote de la culture. Il est important de recueillir des échantillons de fumier pendant les opérations d'épandage en vue de leur analyse, de consigner les doses épandues, le délai entre l'épandage et l'incorporation et les conditions météorologiques au moment des épandages. Ces données permettent d'évaluer avec plus de précision les éléments nutritifs assimilables et les carences qui peuvent être comblées au moyen d'épandages d'engrais minéraux.

Cultures bénéficiant d'épandages de fumier

Le maïs-grain est une culture pour laquelle on utilise couramment du fumier, car il a un grand besoin d'azote et il sert souvent d'aliment pour animaux sur les fermes d'élevage. L'utilisation de fumier pour combler tous les besoins d'une culture de maïs en azote apporte cependant au sol plus de phosphore et de potassium que la culture n'en prélève. Au fil des ans, les concentrations de ces deux éléments dans le sol risquent de devenir excessivement élevées.

Il est possible d'éviter cette accumulation. On peut cultiver le maïs-grain en rotation avec d'autres cultures, comme la luzerne, qui prélèvent de grandes quantités de phosphore et de potassium. Il est aussi possible de réduire les taux d'épandage du fumier de deux tiers à trois quarts des besoins en

azote et de fournir le reste avec un engrais azoté. Cette pratique assure un meilleur équilibre entre les apports de phosphore et de potassium et les prélèvements de ces éléments nutritifs par la culture.

Quand le fumier est épandu l'été sur des cultures sur pied, comme des cultures de maïs ou des cultures fourragères, les doses doivent être inférieures à 40 m³/ha (4 000 gal/acre), ce plafond étant plus bas encore dans le cas des fumiers très concentrés. L'épandage de fumier sur des cultures fourragères doit se faire dès que possible après la récolte pour éviter les brûlures d'azote (causées par l'ammoniac) sur les nouvelles feuilles.

Les peuplements fourragers bien établis qui renferment une part importante de graminées sont ceux qui bénéficient le plus de l'azote contenu dans le fumier.

Les épandages de fumier sur des cultures céréalières, les céréales de printemps ou le soya devraient être faits avec précaution, puisqu'une dose trop élevée accroîtra l'incidence de la verse.

Semis direct et fumier

Le fumier demeure l'un des facteurs qui rend les éleveurs de bétail réticents à passer au semis direct. Les exploitants qui doivent gérer du fumier et qui pratiquent aussi le semis direct doivent faire des concessions, soit accepter de travailler un peu le sol, soit accepter certaines pertes d'éléments nutritifs compris dans le fumier.

La rotation des cultures est importante dans un système de semis direct et un système de travail réduit du sol. Voici les façons de procéder les plus répandues :

- **Épandage de fumier sur les champs de blé après la récolte, suivi d'un travail superficiel du sol.** Cette façon de procéder procure une dégradation plus rapide des résidus de blé et atténue le

risque d'interférence allélopathique pour la culture de maïs prévue tout en dérangeant le sol au minimum et en réduisant les risques qu'il se compacte. Cette méthode fait en outre un bon usage des éléments nutritifs présents dans le fumier, particulièrement si elle se double d'une culture de couverture automnale. Sur les sols sableux sujets au lessivage, les taux d'épandage doivent tenir compte de la quantité et du type d'azote épandu. Dans la plupart des cas, le fumier solide à forte teneur en azote organique comporte moins de risque de pertes par lessivage.

- **Utilisation du fumier sur des cultures fourragères.** Même si les légumineuses fourragères ne tirent pas pleinement profit de l'azote du fumier, elles utilisent néanmoins le phosphore et le potassium. Les graminées fourragères feront une meilleure utilisation de l'azote et profiteront aussi du P et du K.
- **Utilisation d'un système de semis en bandes** lorsque le fumier peut être épandu et incorporé dans des bandes d'une profondeur de 15 à 20 cm (de 6 à 8 po) à l'automne ou au printemps. À l'aide d'un système de guidage, une culture peut être plantée dans la même bande. Les éléments nutritifs sont placés près de l'endroit où la culture peut les utiliser, et la zone entre les bandes demeure non travaillée avec un plein couvert de résidus.
- **Épandage avec injection de fumier liquide en bandes latérales dans une culture de maïs sur pied.** De cette façon, le fumier est mis en contact avec la culture au moment où celle-ci a le plus besoin d'éléments nutritifs et où, souvent, le risque de tassement du sol est réduit. Le plus gros inconvénient est le besoin en temps. La conception de l'injecteur doit être examinée pour minimiser le risque de dommage aux végétaux et de réduction des populations de végétaux.

Préoccupations environnementales

L'utilisation de fumier ou d'autres éléments nutritifs de source organique est un moyen écologique de répondre aux besoins des cultures. Toutefois, comme pour toute source d'éléments nutritifs, les épandages excessifs ou mal faits peuvent être nuisibles pour l'environnement en entraînant une contamination des cours d'eau, des eaux de ruissellement et de l'eau de percolation.

Évitez d'épandre du fumier durant l'hiver sur des sols gelés ou couverts de neige ou au début du printemps lorsque les sols sont saturés, en raison du ruissellement possible dans les eaux de surface. Les sols gelés ne peuvent pas absorber les éléments nutritifs qui sont épandus et il n'y a pas non plus de culture en croissance pour les prélever du sol. Il faut plutôt épandre le fumier lors de périodes sèches et douces, lorsque le fumier épandu peut être immédiatement incorporé. L'épandage sur des champs avec des cultures en croissance ou sur une épaisse couche de résidus loin des eaux de surface est aussi une option pour les cas où l'épandage hivernal peut être nécessaire. Il ne faut pas épandre du fumier près des eaux de surface. Une bande tampon de végétation aidera à piéger les matières qui pourraient s'écouler du champ et à les garder hors des lacs et des cours d'eau.

La pluie risque d'emporter l'azote organique vers les cours d'eau si le fumier est épandu sur des terres non protégées. Le phosphore peut être emporté vers les cours d'eau soit comme phosphore réactif dissous transporté dans les eaux de surface ou comme phosphore fixé aux particules de sol. En réduisant au minimum le ruissellement sur les champs qui reçoivent des épandages de fumier, on réduit du même coup les risques de voir des éléments nutritifs et des agents pathogènes dangereux contaminer les cours d'eau.

Les eaux qui s'écoulent dans les tuyaux de drainage peuvent devenir contaminées si le fumier s'infiltré dans un étang collecteur. Dans le cas de fumier liquide, une zone tampon de 9 mètres (30 pi) devrait être maintenue autour d'un étang collecteur ou d'une prise d'eau de surface, alors qu'une zone tampon de 4,5 mètres (15 pi) est suggérée pour du fumier solide. Il est aussi possible de bloquer l'écoulement de la conduite durant et après l'épandage. Il faut considérer toutes les prises d'eau de surface comme des voies d'accès direct aux eaux de surface et les gérer en conséquence.

L'écoulement peut également devenir contaminé si le fumier s'infiltré dans les anfractuosités et les macropores du sol et atteint les drains souterrains (consultez la figure 2–12 du chapitre 2). Ce problème risque davantage de survenir dans des sols argileux ou dans des loams argileux où il y a tassement et gonflement du sol. Un léger travail du sol avant l'épandage perturbera les canaux et minimisera grandement le risque de mouvement. Le blocage de l'écoulement de la conduite pendant et après l'épandage peut aussi fonctionner.

Utilisation sécuritaire du fumier dans des quantités supérieures aux besoins de la culture

Les grandes exploitations d'élevage qui disposent d'une faible superficie cultivable ont des défis particuliers à relever. Pour éviter l'épandage excessif d'éléments nutritifs, l'exportation de fumier vers des fermes qui ne font pas d'élevage ou des exploitations de compostage peut être nécessaire. Si cela est impossible, il faut limiter les épandages de fumier aux besoins en phosphore de la culture. Même si le risque découlant du lessivage excessif d'azote est minimal sur les sols à texture lourde, les pertes par dénitrification

peuvent être substantielles, ce qui peut entraîner des émissions de gaz à effet de serre. Les doses d'engrais azotés peuvent aussi engendrer l'épandage excessif de phosphore et de potassium. Le phosphore excédentaire est préoccupant s'il atteint une eau de surface, car il provoque alors la formation d'algues. Ne pas appliquer de fortes doses dans les zones qui risquent d'être soumises au ruissellement de surface ou à l'érosion. L'incorporation du fumier peut aussi contribuer à réduire la concentration de phosphore dans les eaux de ruissellement.

Valeur à long terme du fumier

Les avantages de l'épandage de fumier s'étendent au-delà de l'année d'épandage. Voici un résumé de ces avantages :

- Le fumier aide à reconstituer le phosphore et le potassium assimilables dans les sols. L'analyse de sol est le meilleur moyen d'évaluer la biodisponibilité à long terme des éléments nutritifs.
- Le fumier enrichit le sol d'éléments nutritifs secondaires, d'oligo-éléments et de matière organique.
- Il ajoute de l'azote organique, lequel devient assimilable en quantités décroissantes dans les années suivant l'épandage.
- L'ajout de matière organique améliorera la structure et la capacité de rétention d'eau du sol.
- L'apport en matière organique augmente aussi la capacité du sol à retenir les éléments nutritifs.
- Les risques d'encroûtement du sol sont diminués lorsque les épandages de fumier se font périodiquement.
- L'épandage de fumier ajoute une diversité microbienne et fournit une source alimentaire aux microorganismes terricoles, lesquels à leur tour favorisent des systèmes racinaires plus importants et une meilleure tolérance à la sécheresse.

Exigences liées à la réglementation

Chaque province et état réalisent un certain contrôle réglementaire sur l'épandage de fumier et de biosolides, les solutions nutritives de serre et autres fertilisants organiques. Les règlements en vigueur peuvent viser la protection de l'environnement en général et s'appliquer à tous les citoyens, ou viser spécifiquement les personnes qui font des épandages en leur précisant quand et où ces épandages peuvent se faire. En Ontario, les dispositions de nature générale sont contenues dans la *Loi sur la protection de l'environnement* et la *Loi sur les ressources en eau de l'Ontario*, qui prévoient des amendes pour quiconque pollue des eaux de surface ou des eaux souterraines ou leur nuit d'une manière ou d'une autre. La *Loi sur les pêches* (Canada) interdit par ailleurs de rejeter une substance nocive dans une eau de surface. Dans la deuxième catégorie, la *Loi de 2002 sur la gestion des éléments nutritifs* renforce les règlements sur le stockage, la manutention et l'épandage au sol de matières contenant des éléments nutritifs.

Il est important de connaître les versions les plus récentes de toutes les lois et de tous les règlements qui s'appliquent dans la collectivité publique où est prévu l'épandage de matières organiques.

Fumier

Les épandages de fumier dans les fermes d'élevage de l'Ontario sont soumis à la *Loi de 2002 sur la gestion des éléments nutritifs*, qui s'assortit du Règlement de l'Ontario 267/03 (tel qu'il a été modifié). Les fermes qui sont soumises aux dispositions d'inclusion progressive du règlement doivent se doter d'une stratégie de gestion des éléments nutritifs. Les exploitations avec plus de 300 unités nutritives ou qui se trouvent à moins de

100 m d'un puits municipal ont l'obligation de se doter d'un plan de gestion des éléments nutritifs (PGEN) et de le respecter lors de l'épandage d'éléments nutritifs. Les producteurs et les conseillers sont invités à consulter le règlement pour plus de détails. La version la plus à jour du règlement est diffusée sur le site ontario.ca/lois-en-ligne.

Matières de source non agricole (MSNA)

Les matières de source non agricole, ou MSNA, comprennent les matières traitées et recyclées provenant de sources non agricoles, comme les résidus de feuilles et de jardin, les pelures de fruits et de légumes, les résidus de transformation des aliments, les biosolides provenant de la pulpe et du papier et les biosolides d'épuration qui sont épandus sur des terres agricoles afin de procurer un avantage. Ces matières sont placées dans des catégories en fonction du risque environnemental (métaux, odeur, agents pathogènes). En Ontario, les MSNA sont réglementées en vertu de la *Loi de 2002 sur la gestion des éléments nutritifs*, qui prévoit que les matières comme les biosolides d'épuration doivent respecter des critères de qualité pour les agents pathogènes et les métaux avant de pouvoir être épandues au sol. L'épandage de biosolides doit respecter les critères précisés dans un plan MSNA.

Le plan MSNA ressemble au PGEN, car les deux documents traitent de l'épandage sur les biens-fonds d'éléments nutritifs et les deux documents s'intéressent aux éléments vulnérables, comme les cours d'eau et les puits. Cependant, le plan MSNA est réalisé pour un champ et un lieu d'épandage donnés, et comprend l'analyse des matières et des sols pour 11 métaux. Il peut inclure d'autres exigences, comme des limites de gras, d'huile et de graisse, de bore ou de sodium. Les plans MSNA incluent des

restrictions sur les distances de recul par rapport aux eaux de surface et des limites relatives à l'épandage sur les champs avec un pH inférieur à 6,0 ou les champs avec un dosage de phosphore supérieur à 60 ppm, ainsi que des délais entre le moment de l'épandage et la récolte de différentes cultures.

Les exigences détaillées pour l'épandage de matières de source non agricole peuvent être trouvées dans la version la plus récente du Règlement de l'Ontario 267/03 de la *Loi de 2002 sur la gestion des éléments nutritifs* à ontario.ca/lois-en-ligne.

Solutions nutritives de serre

Plusieurs exploitations serricoles utilisent des systèmes de circulation pour distribuer l'eau et l'engrais aux cultures de serre cultivées sans sol. À un moment donné, la solution nutritive ne convient plus à la croissance des cultures de serre, mais peut être utilisée pour fertiliser d'autres cultures agricoles. Une solution nutritive de serre est la solution nutritive retirée d'un système de circulation fermé dans une exploitation serricole inscrite en vertu du Règlement de l'Ontario 300/14 : Solutions nutritives de serre.

Comme pour d'autres éléments nutritifs réglementés aux termes de la *Loi de 2002 sur la gestion des éléments nutritifs*, des restrictions existent quant au dosage d'éléments nutritifs épandus, au moment de l'épandage et aux distances de retrait par rapport aux éléments sensibles. Les exigences complètes peuvent être consultées à ontario.ca/lois-en-ligne.

Éléments nutritifs provenant des résidus de culture

Les cultures de couverture et les résidus de culture présentent plusieurs avantages dans un système de culture, notamment la séquestration des éléments nutritifs, le contrôle de l'érosion du sol et l'amélioration du cycle des éléments nutritifs. Au fur et à mesure de leur décomposition, les résidus de culture peuvent apporter aux cultures à venir des quantités appréciables d'azote. Si les résidus de légumineuses sont très avantageux à cet égard, les résidus de cultures autres peuvent aussi donner lieu à une minéralisation de l'azote. Cela peut être important en présence de grandes quantités de résidus laissés sur place après la récolte (comme en horticulture), résidus qui ne sont pas parvenus à maturité. Il s'agit là d'une source d'azote qui est sous-utilisée.

Les légumineuses sont un cas d'espèce en agriculture parce qu'elles établissent des rapports symbiotiques avec des bactéries (rhizobiums) qui convertissent l'azote atmosphérique en azote ammoniacal, assimilable par les végétaux. Les légumineuses cultivées principalement pour la production de semences, comme le soya, utilisent cet azote pour la croissance et le rendement de la culture et en laissent peu ou pas dans le sol pour la culture suivante.

Par ailleurs, les légumineuses fourragères vivaces sont une source d'azote supplémentaire, puisqu'elles ont tendance à fixer plus d'azote que ce qui est nécessaire pour la culture actuelle. L'azote produit par les légumineuses est fixé presque totalement sous forme organique et n'est pas assimilable tant que les résidus ne se sont pas décomposés. L'azote résiduel doit être pris en compte lorsqu'on planifie un programme de fertilisation pour la culture suivante. Une température printanière fraîche peut retarder ce processus.

Lorsqu'on analyse les effets des légumineuses sur la croissance des prochaines cultures, il est important de distinguer les effets des propriétés physiques, comme l'amélioration de la structure du sol et de son état d'ameublissement, des effets de l'azote résiduel. L'effet d'une culture de couverture de trèfle des prés sur de telles propriétés s'est avéré bénéfique pour le rendement de la culture de maïs suivante en Ontario, même avec l'épandage de suffisamment d'engrais azoté (tableau 6–12).

Tableau 6–12. Rendements du maïs-grain avec et sans ensemencement sous couverture de trèfle des prés

Année	Rendement du maïs sans trèfle des prés kg/ha (bu/acre)	Rendement du maïs avec trèfle des prés kg/ha (bu/acre)
2010	11 675 (186)	12 428 (198)
2011	9 855 (157)	10 169 (162)
2012	10 985 (175)	11 550 (184)
2013	13 621 (217)	13 433 (214)
2014	11 926 (202)	14 312 (228)
2015	13 621 (217)	14 123 (225)
2016	11 926 (190)	12 554 (200)
Moyenne (2010-2016)*	11 989 (191)	12 554 (200)

* Indique une différence statistiquement importante à P = 0,05.

Remarque : Les rendements du maïs-grain avec une rotation maïs-soya-blé, avec ou sans ensemencement sous couverture de trèfle des prés (trèfle des prés semé pour la première fois en 2009) dans le cadre d'un essai à long terme de rotation des cultures et de travail du sol au campus Ridgeway de l'Université de Guelph. Engrais azoté épandu sur le maïs à une dose de 202 à 269 kg/ha (de 180 à 240 lb/acre).

Source : D' Dave Hooker, Université de Guelph. 2010–2016.

Légumineuses dans un système cultural

Les principales légumineuses fourragères qui s'inscrivent dans les rotations des cultures pratiquées en Ontario sont la luzerne, le trèfle des prés et le lotier corniculé. La luzerne et le lotier corniculé sont généralement récoltés comme foin et conservés pendant au moins deux ans. Le trèfle des prés est habituellement inclus dans la rotation comme culture de couverture à la suite de petites céréales, la croissance étant arrêtée à la fin de la première année ou au début de la saison de croissance suivante, juste avant les semis de maïs.

Les plus grands avantages des légumineuses fourragères se manifestent durant la première année après l'enfouissement. Toutefois, des effets bénéfiques résiduels peuvent survenir au cours des années suivantes. Les concentrations d'azote des nitrates dans le sol à la fin mai et les rendements indexés présentés dans le tableau 6–13 montrent que la biodisponibilité potentielle de l'azote et les hausses de rendement après une culture de légumineuses fourragères peuvent être supérieures au cours de la première année où le maïs est cultivé et encore par la suite.

Accumulation totale d'azote

Le trèfle des prés destiné à servir d'engrais vert et utilisé comme culture de couverture après des céréales, peut également accumuler une quantité appréciable d'azote, soit environ 40 kg/ha (35 lb/acre) pour chaque tonne de parties aériennes par hectare. Un peuplement relativement serré de trèfle des prés de 30 cm (1 pi) de hauteur produit environ 4 tonnes de parties aériennes/ha (2 t imp./acre) et contient environ 160 kg de N/ha (140 lb/acre). Cependant, les rendements du trèfle des prés d'enfouissement établi comme culture de couverture après des céréales varient plus généralement de 1 à 3 t/ha (0,5 à 1,5 t imp./acre). La contribution de l'azote et de la biomasse ne provient pas seulement des parties aériennes. La croissance racinaire du trèfle des prés augmentera de 4 à 6 fois si l'enfouissement à l'automne est retardé du 1^{er} septembre au 15 octobre. La plus grande partie des racines (jusqu'à 75 %) sont situées dans les premiers 15 cm (6 po) du sol.

Tableau 6–13. Effets de la rotation des cultures sur la concentration d'azote des nitrates dans le sol après les semis et sur les rendements du maïs

Rotation	Première année du maïs		Deuxième année du maïs	
	NO ₃ -N dans le sol (kg/ha)	Rendement (%)	NO ₃ -N dans le sol (kg/ha)	Rendement (%)
monoculture de maïs	9,1	100	9,5	100
soya–soya–maïs–maïs	12,6	104	10,6	97
soya–blé–maïs–maïs	10,9	104	12,0	98
soya–blé + trèfle–maïs–maïs	16,7	107	12,7	99
luzerne–luzerne–maïs–maïs	17,8	108	14,7	102

Effets de la rotation des cultures sur la concentration d'azote des nitrates dans le sol deux semaines après les semis, et sur les rendements du maïs. Les quantités sont indexées relativement à une monoculture de maïs pour la première et la deuxième année de production. D'après des données recueillies dans le cadre d'une rotation à long terme.

Source : T. Vyn, Département de phytotechnie, Université de Guelph.

Azote assimilable provenant des légumineuses

Ce n'est pas tout l'azote produit par les légumineuses qui est assimilable. Le taux de minéralisation peut limiter l'assimilation de l'azote au moment où la culture suivante en a besoin. Une partie de l'azote peut être incorporée dans la matière organique du sol ou perdue par volatilisation ou par lessivage. Il n'en reste pas moins que la quantité d'azote assimilable produit par les légumineuses fourragères peut être considérable et peut souvent combler la totalité des besoins en azote de la culture de maïs qui les suivent.

Il est difficile de prévoir avec précision la quantité d'azote assimilable que procurent les légumineuses fourragères, les calculs étant liés à un certain nombre de facteurs, dont le rythme de croissance des légumineuses, la température et la teneur en eau du sol au printemps, la méthode de travail du sol et le moment où les légumineuses sont rabattues.

Évidemment, si le taux de croissance des légumineuses est faible ou si la densité de peuplement est variable d'un secteur à l'autre du champ, les crédits d'azote attribuables aux légumineuses doivent être inférieurs aux valeurs recommandées. Toutefois, si la croissance des légumineuses (luzerne,

lotier corniculé ou trèfle des prés) a été excellente, les valeurs recommandées (tableau 6–14) sont assez modérées. Selon plusieurs études menées en Ontario, il n'est pas nécessaire de prévoir un apport d'engrais azoté lorsque le maïs suit un excellent peuplement de légumineuses fourragères vivaces.

L'assimilation potentielle de l'azote de légumineuses fourragères par le maïs peut être réduite si les conditions météorologiques en mai et en juin sont extrêmement sèches ou humides. Une pluviosité excessive peut entraîner des pertes par dénitrification ou par lessivage. Si les conditions de sol sont extrêmement sèches, en particulier en mai ou en juin, les taux de minéralisation de l'azote des légumineuses peuvent être réduits, ce qui diminue la quantité assimilable par le maïs.

Qu'est-ce qu'un peuplement complet?

Un peuplement complet de trèfle, de luzerne ou de lotier corniculé correspond à toute densité supérieure à 120 plants par m² (12 plants par pi²). Par conséquent, un peuplement à 50 % correspond à 60 plants par m² (6 plants par pi²), et un peuplement à 33 % correspond à 4 plants. Le crédit d'azote est le même, que l'espace entre les plants soit vide ou rempli de graminées et de mauvaises herbes.

Tableau 6–14. Rajustement des besoins en azote (c.-à-d. le crédit d'azote) après des légumineuses

Type de culture	kg/ha	lb/acre
fourrages établis — moins d'un tiers de légumineuses	0	0
fourrages établis — $\frac{1}{3}$ – $\frac{1}{2}$ de légumineuses	55	50
fourrages établis — $\frac{1}{2}$ de légumineuses ou plus	110	100
légumineuses vivaces semées et retournées la même année	78 (pour le maïs de grande culture)	70 (pour le maïs de grande culture)
	45 (toutes les autres cultures)	40 (toutes les autres cultures)
résidus de soya et de haricots de grande culture	30 (pour le maïs de grande culture)	27 (pour le maïs de grande culture)
	0 (toutes les autres cultures)	0 (toutes les autres cultures)

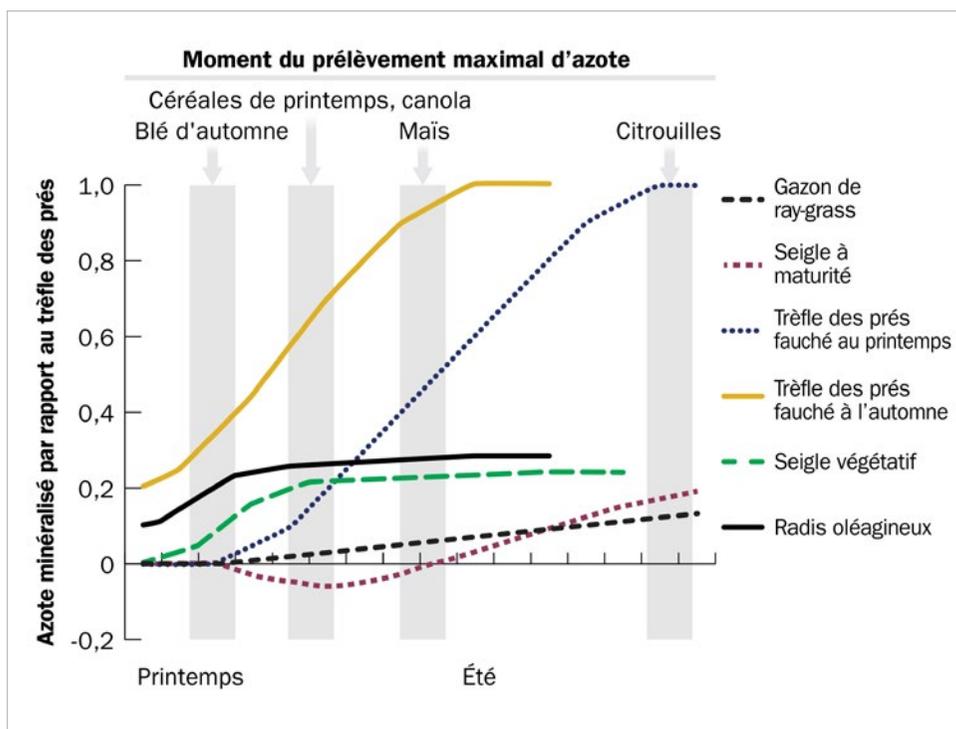


Figure 6-2. Minéralisation de l'azote provenant de résidus de cultures de couverture — moment et quantité relatifs

Optimisation de la récupération de l'azote

L'azote du fumier ou de résidus de culture n'est utile que s'il est libéré lorsque la culture en a besoin. Si la minéralisation de l'azote se produit trop tôt, l'azote risque de pénétrer dans le sol et d'atteindre une profondeur située hors de portée des racines. Si l'azote est libéré trop tard, la culture souffre d'une carence. C'est ce qu'illustre la figure 6-2.

Les méthodes de travail du sol qui incorporent au sol la partie aérienne des légumineuses (passage de la charrue à versoirs, de la charrue chisel ou d'un pulvérisateur) amènent une libération plus rapide de l'azote contenu dans les résidus que le semis direct. Une analyse a démontré une réaction de l'azote provenant d'une culture de couverture de trèfle des prés 10 % moins grande quand

le maïs était soumis au semis direct que lorsqu'il était précédé d'un travail du sol.

Par ailleurs, des études portant sur le semis direct montrent que même si le trèfle des prés fauché au printemps accumule davantage d'azote, le trèfle des prés fauché à l'automne permet un meilleur rendement du maïs en l'absence d'engrais azoté et nécessite moins d'engrais azotés pour optimiser les rendements. Cela laisse à penser que la minéralisation de l'azote provenant du trèfle des prés fauché à l'automne est plus assimilable lorsque le maïs en a besoin par rapport au trèfle des prés fauché au printemps lorsque le maïs est soumis au semis direct. Un simple système de crédit donne une idée générale de la biodisponibilité de l'azote (consultez le tableau 6-14). Les différents taux de croissance des cultures (et par le fait même les différentes concentrations d'azote dans

leurs résidus) et les différentes conditions de sol et conditions météorologiques qui influencent la minéralisation font en sorte que la biodisponibilité exacte de l'azote varie d'une année à l'autre. Toutefois, le dosage des nitrates du sol aide à prédire le besoin d'engrais azoté.

Assimilation de l'azote provenant de résidus qui ne sont pas des légumineuses

Plusieurs cultures horticoles sont récoltées avant que les plants atteignent leur maturité physiologique, et une partie relativement petite du plant est retirée du champ. Cela laisse de grandes quantités de matières vertes et grasses dans le champ, qui peuvent se dégrader rapidement pour libérer de l'azote minéral dans le sol. Dans les cas où plusieurs cultures sont cultivées dans le même champ, cet azote peut réduire le besoin d'engrais des cultures suivantes.

Cultures de couverture pour la gestion de l'azote

Des peuplements relativement bons de cultures de couverture qui croissent activement, notamment des légumineuses comme le trèfle des prés, prélèveront (séquestreront) des quantités importantes d'éléments nutritifs, incluant l'azote minéral du sol. En Ontario, des cultures de couverture qui ont succédé à du blé d'automne ont réduit la concentration de nitrates laissée dans le sol en octobre et en novembre de 50 % comparativement aux endroits où aucune culture de couverture n'avait été plantée. La figure 6-3 montre la quantité de nitrates résiduels dans le sol que les cultures de couverture enlèvent du sol après une culture légumière. Ces cultures font donc en sorte de réduire les quantités d'azote des nitrates biodisponibles qui peuvent se perdre durant l'hiver.

Sous des conditions de croissance optimales, les cultures de couverture autres que de légumineuses (ray-grass, céréales à grains) peuvent prélever des quantités considérables d'azote minéral du sol. Le radis oléagineux soumis à des conditions de croissance optimales pourrait contenir jusqu'à 100 kg d'azote/ha dans ses parties aériennes.

Même si les cultures de couverture autres que de légumineuses peuvent séquestrer une quantité importante d'azote, elles ne font pas augmenter autant le rendement de la culture (maïs) qui les suit que les cultures de couverture de légumineuses. À ce jour, il a été difficile de démontrer une réduction constante des besoins des cultures en engrais azoté à la suite d'une culture de couverture qui n'est pas une légumineuse. Le taux de croissance, le ratio C:N et les conditions météorologiques printanières auront un effet sur le cycle des éléments nutritifs et la minéralisation de l'azote.

Le moment où s'effectue la minéralisation de l'azote fourni par les différentes cultures de couverture varie considérablement (consultez la figure 6-2). Le radis oléagineux et les céréales de printemps ont tendance à commencer à libérer de l'azote tôt au printemps, à un moment où cet azote risque de se perdre.

Certaines cultures de couverture, par exemple le ray-grass, résistent étonnamment à la décomposition. Même si elles absorbent des quantités importantes d'azote, très peu de cet azote est libéré au cours de la saison de croissance pour la culture suivante.

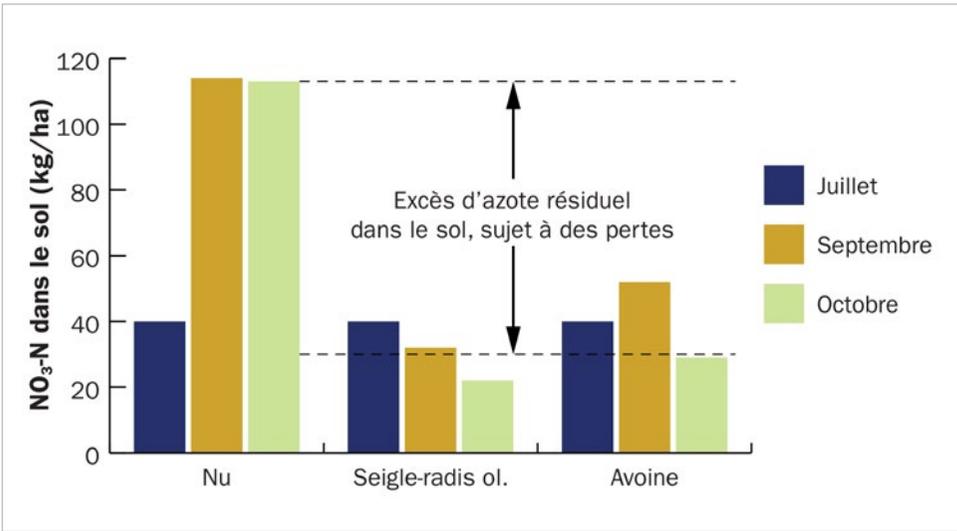


Figure 6-3. Immobilisation de l'azote par différentes cultures de couverture après une récolte de concombres. Source : D^{re} Laura Van Eerd, Université de Guelph, Ridgetown. 2004.

Il existe des cas où les cultures de couverture peuvent inhiber la croissance de la culture suivante. Une épaisse couche de résidus de culture peut garder le sol frais et humide au printemps, ralentissant la germination et le développement de la culture et la minéralisation des éléments nutritifs. Elle peut aussi nuire physiquement au fonctionnement des semoirs et réduire ainsi la densité de peuplement. Cette couche de résidus peut par ailleurs abriter des organismes nuisibles, tels que limaces ou nématodes, qui peuvent s'attaquer aux cultures. Les cultures de couverture sont un volet d'un système cultural et leur intégration nécessite souvent des rajustements à d'autres éléments du système afin de maximiser les avantages et de minimiser les risques pour la culture.

Références

- National Agricultural Statistics Service, USDA. Recensement 2002.
- Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario. 2015. Règlement de l'Ontario 267/03 (modifié par le Règl. de l'Ont. 284/13).
- Statistique Canada. Recensement de l'agriculture de 2001.

7. Recommandations de fertilisation

Pour parvenir à une recommandation de fertilisation correcte, il faut tenir compte de plusieurs facteurs liés à la réaction de la culture aux éléments nutritifs épandus et aux objectifs du producteur. Les recommandations élaborées pour une culture et le milieu précis où elle pousse tiennent compte des données suivantes :

- analyses de sols;
- résultats de l'analyse des tissus végétaux;
- exigences de qualité à satisfaire;
- objectifs économiques et de production;
- pratiques culturales;
- risques environnementaux potentiels.

Facteurs limitant la réaction des cultures à la fertilisation

De nombreux facteurs influencent les gains de rendement que procure la fertilisation. Le producteur ne peut pas toujours intervenir sur ces facteurs. Les grandes pratiques culturales (gestion de l'eau, du sol et des ennemis des cultures) peuvent faire en sorte que les apports d'engrais se traduisent par des gains ou des pertes de rendement. Le tableau 7-1 résume ces facteurs.

Tableau 7-1. Facteurs limitant la réaction des cultures à la fertilisation

Catégorie	Facteur	Effet sur l'efficacité de la fertilisation	Exemple
gestion de l'eau contenue dans le sol	sol sec	nuit au transport des éléments nutritifs vers les racines et à leur diffusion dans les végétaux	carence en bore chez la luzerne
		restreint la croissance et l'activité des racines	absence de réaction à l'épandage d'engrais à la surface du sol
	augmente la concentration de sel dans le sol	risque de brûlure par l'engrais	
sol détrempé	sol détrempé	réduit la croissance des racines et leur habileté à prélever les éléments nutritifs	culture de maïs jaune dans les zones inondées
		modifie la composition chimique des éléments nutritifs dans les sols pauvres en oxygène	dénitrification de N; amélioration de la biodisponibilité du Mn dans les traces de pneus
sol froid et détrempé	sol froid et détrempé	réduit la croissance et l'activité des racines	carence en phosphore dans les semis de maïs
rotation des cultures	structure du sol	influence le volume de sol que les racines occupent	concentrations optimales supérieures de P et K dans les sols compactés
	éléments nutritifs rémanents dans les horizons profonds du sol	les cultures à racines profondes comprises dans la rotation prélèveront les éléments nutritifs dans les horizons profonds du sol	azote prélevé à des profondeurs plus grandes dans le sol par les betteraves à sucre et les carottes
	culture précédente	influence les réserves et la biodisponibilité des éléments nutritifs dans le sol	besoins en engrais azoté rares dans le maïs qui suit la luzerne
cultures créent des associations mycorrhiziennes		prélèvement précoce de P par le maïs (une culture mycorrhizienne) qui peut être réduit si la culture précédente n'était pas mycorrhizienne (p. ex. du canola)	

Tableau 7-1. Facteurs limitant la réaction des cultures à la fertilisation

Catégorie	Facteur	Effet sur l'efficacité de la fertilisation	Exemple
facteurs agronomiques	choix du travail du sol	influence les populations de mycorhizes, celles-ci étant moins grandes quand le sol est davantage travaillé	plus grande réponse au P contenu dans les engrais de démarrage si le sol est soumis à des méthodes traditionnelles de travail du sol que s'il est soumis au semis direct
		favorise la minéralisation de l'azote	le crédit de N est plus grand quand le sol est travaillé après l'enfouissement d'une culture de couverture de trèfle des prés
		lorsqu'il se fait en profondeur, peut diluer les concentrations d'éléments nutritifs dans le sol	faible niveau de fertilité des buttes érodées où les outils aratoires ramènent le sous-sol en surface
		les semis directs favorisent la stratification des éléments nutritifs immobiles	réaction plus forte du maïs au K lorsque celui-ci est épandu en bandes dans les systèmes de semis direct
lutte contre les ennemis des cultures	mauvaises herbes	un sol très fertile favorise la croissance de la culture et des mauvaises herbes	l'épandage en bandes permet de rendre les éléments nutritifs moins accessibles aux mauvaises herbes
	maladies des racines	influencent l'aire superficielle des racines et la quantité des éléments nutritifs que celles-ci prélèvent	besoins accrus en N des haricots blancs lorsqu'ils souffrent de pourriture des racines
	nématodes	interfèrent avec l'efficacité du prélèvement par les racines	concentrations optimales de K dans le sol plus grandes en présence du nématode à kyste du soya
facteurs agronomiques	choix du cultivar ou de l'hybride	habitudes d'enracinements influencées par les différences génétiques	tendance des cultivars de pomme de terre dotés de petits systèmes racinaires à réagir à des niveaux de fertilité plus grands
		différences génétiques créant des usages finaux et des qualités variables	dans le cas du blé et de la pomme de terre, variation des recommandations de fertilisation azotée en fonction du cultivar
		une susceptibilité variable aux maladies découlant de différences génétiques	les cultivars de blé susceptibles à la maladie réagissent mieux à l'azote lorsque les maladies sont contrôlées, la réponse dépendant du moment où le fongicide est épandu et des conditions de la saison de croissance
		chez le maïs, les différences génétiques créent des réactions différentes à l'épandage d'azote retardé	certains hybrides de maïs réagissent moins à des épandages d'azote en fin de saison que d'autres hybrides, même si la réponse peut aussi être reliée aux conditions de la saison de croissance
	verse	réduit les rendements lorsque les cultures sensibles à la verse reçoivent trop d'azote	réduction des doses optimales de N dans les céréales sensibles à la verse
	densité de peuplement et espacement des plants	plus la densité de peuplement est grande, plus les prélèvements d'éléments nutritifs sont importants	selon des recherches visant à maximiser le rendement du maïs, les peuplements de maïs à forte densité réagiraient parfois davantage à la fertilité du sol

Élaboration de recommandations de fertilisation

Le besoin d'ajouter de l'engrais est déterminé par une approche diagnostique. Cette approche est essentielle à la gestion de la fertilité des sols et à l'établissement de recommandations. Les outils de diagnostic sont les suivants :

- analyses de sols;
- analyse des tissus végétaux;
- observation des symptômes de carences nutritives.

Une fois le diagnostic établi, l'élaboration de recommandations se heurte à la difficulté de trouver une dose d'engrais qui soit efficace et rentable. Deux méthodes sont fréquemment utilisées pour élaborer des recommandations de fertilisation : l'approche visant à fournir aux cultures une quantité « suffisante » d'engrais et l'approche visant à garantir « l'accroissement et le maintien ». Les deux concepts ont leurs forces et leurs faiblesses selon les objectifs de production de l'agriculteur. Ni l'une ni l'autre de ces approches ne procurera les résultats escomptés sans une pondération des résultats d'analyse de sol.

Pondération des résultats d'analyse de sol

Depuis que les analyses de sol existent, elles sont utilisées pour élaborer des recommandations de fertilisation pour la plupart des principales cultures pratiquées en Europe occidentale et en Amérique du Nord. Les analyses du sol peuvent indexer la biodisponibilité d'un large éventail d'éléments nutritifs et surveiller au fil du temps, les fluctuations dans la fertilité du sol.

Aucune recommandation de

fertilisation raisonnable ne peut être faite sans évaluer la fertilité du sol — directement ou indirectement. Pour les cultures annuelles, les analyses de sol représentent le point de départ. Dans le cas des cultures horticoles vivaces, les recommandations de fertilisation reposent plutôt sur l'analyse des tissus végétaux.

L'analyse de sol ne fournit qu'un indice de la biodisponibilité d'un élément nutritif. Cet indice doit être pondéré en fonction de la réaction réelle de la culture telle qu'elle est mesurée sur le terrain.

La pondération des résultats d'analyse de sol peut se faire suivant différents points de vue. Une approche met davantage l'accent sur la réponse de la culture aux éléments nutritifs épandus. Une autre examine le rendement en lien avec les concentrations d'un élément nutritif dans le sol.

Les recommandations ne sauraient reposer uniquement sur les résultats d'une analyse de sol. D'abord parce que cette analyse ne tient pas compte des variables externes telles que températures de croissance fraîches ou précipitations abondantes survenues après le prélèvement des échantillons de sol. Ensuite parce que l'analyse de sol ne permet pas de prévoir si la culture sera gérée de façon à donner son plein potentiel de rendement. Il faut, en plus de l'analyse de sol, tenir compte des facteurs externes qui se répercutent sur le rendement.

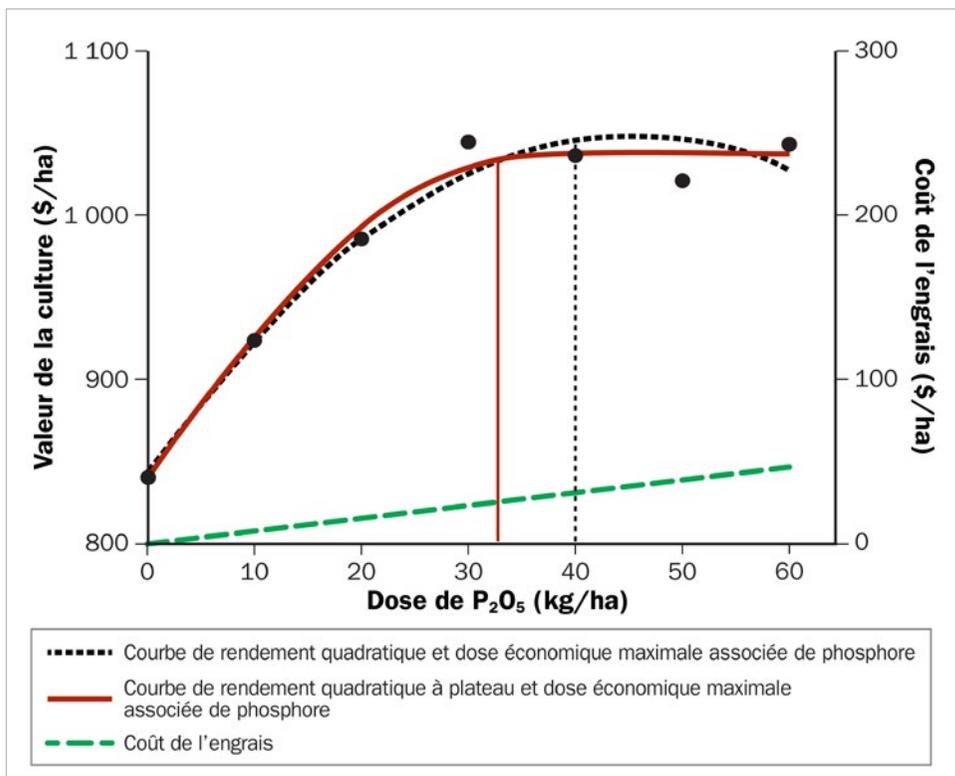


Figure 7-1. Rendement du maïs en réponse à une fertilisation à base de phosphore

Gain de rendement à la suite d'apports d'engrais

C'est au moyen d'expériences menées sur le terrain qu'on précise les apports d'éléments nutritifs nécessaires en fonction des différents résultats d'analyses de sol. Pour ce faire, on applique sur des parcelles différentes présentant un sol relativement uniforme au moins quatre doses différentes, dont une dose nulle, et dans des conditions où seul l'élément nutritif examiné limite la culture. Un graphique est alors élaboré en faisant le tracé graphique du rendement par rapport aux doses d'engrais épandues. Le graphique obtenu sert à tracer une courbe de rendement. La figure 7-1 présente deux courbes de rendement fréquentes. Cette courbe permet de déduire une équation mathématique. Dans ce cas, la courbe en pointillé représente les

données conformément à un modèle quadratique, alors que l'autre courbe représente les données conformément à un modèle quadratique avec plateau.

En connaissant la courbe du rendement, il est possible d'utiliser les renseignements relatifs au prix de l'engrais. Comme le montre la figure 7-1, ces renseignements peuvent servir à calculer la dose d'engrais économiquement optimale (lignes verticales). Plus la dose d'engrais épandue augmente, plus la pente du rendement augmente, avant de diminuer. Au point où les lignes verticales de la figure 7-1 croisent leur courbe respective de rendement se trouve la dose économique maximale d'engrais. Après ce point, l'augmentation du rendement de la culture n'entraîne pas de valeur supplémentaire par rapport

à l'augmentation du coût de l'engrais. Il s'agit de la dose d'engrais la plus élevée

pouvant être justifiée en une année.

Choix d'une équation traduisant le gain de rendement

Les essais visant à mesurer les gains de rendement débouchent tous sur des données pour les rendements à des points individuels : soit l'ajout d'engrais ou des dosages. On se sert ensuite de l'équation dérivée de cette courbe pour prévoir avec plus de précision les besoins en engrais. Le type d'équation retenu pour décrire cette courbe peut influencer les résultats.

Aucune courbe n'est nettement meilleure qu'une autre pour décrire le gain de rendement que procure un apport d'engrais. La plupart des équations ont ceci en commun que le gain de rendement calculé diminue à mesure que l'apport d'engrais augmente, de sorte qu'à partir d'un certain point, la valeur du gain de rendement est inférieure au coût de l'engrais supplémentaire nécessaire pour parvenir à ce rendement. Le point où l'augmentation incrémentielle du rendement est égale au coût supplémentaire de l'engrais nécessaire pour réaliser cette augmentation incrémentielle du rendement est le rendement économique maximal.

L'équation quadratique, l'équation quadratique avec plateau (courbe pleine de la figure 7-1) et l'équation de Mitscherlich (figure 7-2) sont les équations les plus couramment utilisées pour prévoir les gains de rendement à la suite d'apports d'engrais. Une équation quadratique (rendement = $a + bx - cx^2$, où x est la dose d'engrais et a , b et c sont les constantes utilisées pour ajuster la courbe) donne une courbe qui présente de grandes réactions à l'engrais à de faibles doses, diminuant graduellement afin qu'il n'y ait éventuellement plus de réaction à l'engrais ajouté, puis déclinant de manière à prédire une baisse du rendement avec un ajout d'engrais. Une telle équation convient souvent pour les données qui présentent une diminution distincte des rendements à des doses d'engrais plus élevées (p. ex. en cas de verse excessive ou d'une hausse de la maladie chez les céréales en raison d'épandages élevés d'engrais azotés). Cependant, elle ne s'ajuste pas très bien aux données lorsque les rendements se stabilisent clairement. Dans ce cas, un modèle quadratique à plateau s'ajuste mieux aux données dans la plage réactive (consultez la ligne solide de régression dans la figure 7-1).

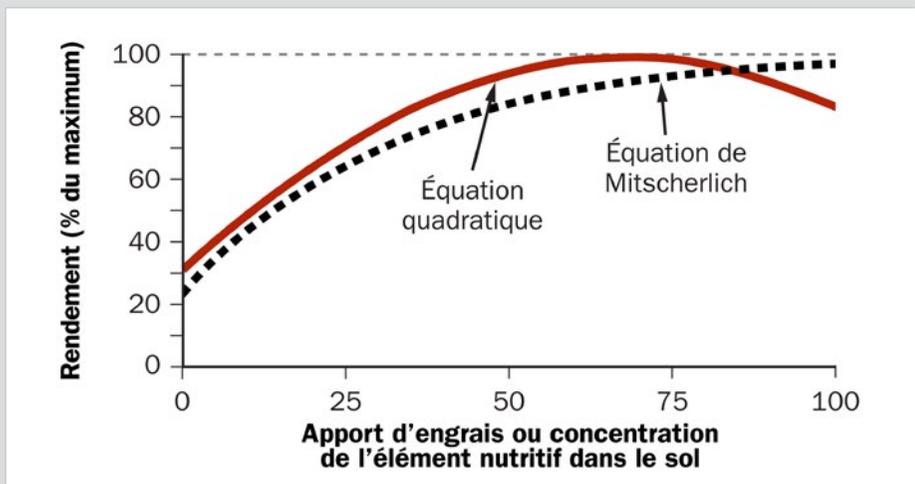


Figure 7-2. Comparaison de deux différentes courbes de rendement

(suite à la page suivante)

(suite de la page précédente)

Comparativement aux modèles quadratiques, l'équation de Mitscherlich a une forme semblable dans le bas de la courbe, mais n'atteint jamais un rendement maximal, ce qui la rend moins utile pour les jeux de données où un rendement maximal a été obtenu ou où les rendements diminuent à des doses d'engrais plus élevées. L'équation de Mitscherlich est la suivante RR (rendement relatif) = $1 - (10^{-[x^{*b}]^c})$, où x est l'engrais ajouté ou la dose, et b et c sont les constantes liées à l'efficacité de l'utilisation d'engrais.

Ces équations peuvent donner des données de rendement économique maximal semblables avec des valeurs modérées d'engrais et de culture. Les écarts s'accroissent si la valeur de la culture est élevée ou si le coût des engrais est faible. L'équation de Mitscherlich permet alors de prévoir un rendement économique maximal nettement plus élevé que l'équation quadratique.

Les équations de gains du rendement sont des outils utiles pour prédire les doses d'engrais économiques maximales, mais comme tous les outils, elles comportent des limites. Même si les équations de Mitscherlich et quadratiques ont des formes semblables dans le bas de la courbe, l'équation de Mitscherlich n'atteint jamais le rendement maximal, alors que l'équation quadratique atteint le maximum puis commence à diminuer, et que l'équation quadratique à plateau atteint un maximum et se stabilise. Dans tous les cas, il est extrêmement important de ne pas prolonger la courbe par extrapolation. Le risque d'une erreur d'interprétation serait trop grand.

Réponse au dosage

Les résultats d'analyse du sol relient les réponses de la culture aux différents dosages. Cela revêt le plus d'importance pour les éléments nutritifs immobiles dans le sol comme le phosphore et le potassium.

Afin de déterminer cette relation, les scientifiques réalisent des expériences au cours desquelles les valeurs des analyses de sol sont rajustées à différentes doses. À chaque dose, deux rendements doivent être mesurés : le rendement sans épandage d'élément nutritif et le rendement avec une dose importante (plus que ce que la plante pourrait possiblement utiliser) de l'élément nutritif épandu. Les rendements relatifs (le rendement non fertilisé comme fraction du rendement non limité) sont représentés en fonction du dosage. On obtient ainsi le niveau critique au-delà duquel la fertilisation procure rarement un avantage à la culture.

Probabilité de gain de rendement compte tenu de la fertilité du sol

Lorsque des expériences sont réalisées sur plusieurs années, une seule courbe de rendement représente précisément la moyenne. Cependant, elle peut ne pas représenter les résultats réels d'une année donnée. Cette variabilité des gains de rendement donne lieu à différentes façons d'interpréter les résultats d'analyse de sol. L'une d'elle consiste à reporter sur un graphique la fréquence des gains de rendement positifs obtenus en fonction des résultats d'analyse de sol. Le dosage devient alors un indice de la probabilité de gain dû à l'élément nutritif.

Tableau 7–2. Probabilité de réaction à la fertilisation à différents niveaux de fertilité du sol

Niveau de fertilité du sol*	Gain de rendement	Probabilité de gain	Dose optimale
faible	gain élevé (GE)	la plupart du temps	élevée
moyen	gain moyen (GM)	environ la moitié du temps	moyenne
élevé	faible gain (FG)	occasionnelle	faible
très élevé	rare gain (RG)	sporadique	très faible
excessif	aucun gain (AG)	négligeable	nulle

* La fertilisation de sols qui renferment déjà des teneurs optimales en éléments nutritifs peut réduire les rendements ou la qualité des cultures en nuisant au prélèvement d'autres éléments nutritifs.

Le tableau 7–2 décrit la probabilité de réaction à la fertilisation à différents niveaux de fertilité du sol. Règle générale, les cultures cultivées dans des sols avec une faible fertilité réagiront la plupart du temps à l'ajout d'éléments nutritifs et la dose optimale d'engrais sera élevée. Les sols présentant un niveau élevé de fertilité auront rarement une réaction rentable à l'épandage d'engrais et les doses optimales seront faibles.

Dans certaines cultures, une réaction est observée à la suite de l'application d'engrais de démarrage ou de phosphore dans la raie de semis à des niveaux de fertilité du sol où l'on n'observe plus aucune réaction lorsque l'engrais est épandu en pleine surface.

Les concentrations élevées d'éléments nutritifs dans le sol nuisent-elles à l'environnement?

Les pertes d'éléments nutritifs provenant du sol peuvent nuire à la qualité des eaux. Le risque dépend à la fois de la source et des éléments nutritifs et des voies de transport. Si le sol est riche, la source est plus importante, mais cela n'a pas d'effet sur les voies de transport. C'est d'ailleurs pourquoi la concentration de phosphore n'est que l'un des éléments pris en compte dans l'indice de phosphore. Sur les terres où les risques d'érosion et de ruissellement sont élevés, la maîtrise des niveaux de P est relativement plus importante. Le phosphore peut également être perdu par écoulement préférentiel ou des macropores vers les tuyaux de drainage. Lorsque les voies de transport sont relativement mineures, les sols avec des concentrations plus élevées de P peuvent présenter un risque relativement faible de danger pour la qualité de l'eau. Peu importe les niveaux de fertilité du sol, l'épandage d'éléments nutritifs à la dose appropriée, au bon moment et au bon endroit aidera à minimiser les pertes dans l'environnement. Cela est important, puisqu'il a été suggéré que des pertes relativement petites de phosphore (c.-à-d. supérieures à de 2,3 à 4,6 kg P₂O₅/ha dans certains cas) pourraient nuire à la qualité de l'eau.

Élaboration des recommandations de fertilisation : « fertiliser la culture » ou « fertiliser le sol »

Il y a deux types de recommandations de fertilisation. L'une consiste à « fertiliser la culture », souvent appelée l'approche suffisante. La deuxième consiste à

« fertiliser le sol », souvent appelée *l'approche d'accroissement et de maintien de la fertilité du sol*. Le tableau 7-3 résume ces deux approches à l'élaboration de recommandations de fertilisation, alors que le tableau 7-4 précise les facteurs qui favorisent l'une par rapport à l'autre.

Tableau 7-3. Comparaison des recommandations de fertilisation suivant les deux méthodes de pondération des résultats d'analyse

Hypothèses, forces et enjeux	Pondération en fonction d'une fertilisation suffisante	Pondération en fonction de l'accroissement et du maintien des éléments nutritifs dans le sol
hypothèses	<ul style="list-style-type: none"> • le coût des éléments nutritifs épanchés est compensé par le gain de rendement de la culture en cours • aucune valeur économique n'est directement attribuée à l'effet résiduel de l'engrais (même si une quantité d'engrais résiduelle au-delà de la capacité de prélèvement de la culture contribuera à la fertilité du sol) • les gains de rendement procurés par de fortes doses d'engrais dans des sols peu fertiles sont à peu près les mêmes que ceux que procurent de faibles doses dans des sols très fertiles 	<ul style="list-style-type: none"> • l'élément nutritif épanché n'est pas fixé par le sol de façon irréversible • l'élément nutritif n'est pas soumis à des pertes par lessivage ou volatilisation • les investissements dans la fertilité du sol profiteront un jour au producteur • l'épandage d'éléments nutritifs au niveau où la culture peut les prélever maintiendra les niveaux de fertilité du sol
forces	<ul style="list-style-type: none"> • selon les analyses portant sur une seule année, procure le rendement net le plus élevé sur l'investissement en engrais et est généralement aussi la plus rentable sur une période de plusieurs années • type de recommandation valable pour les éléments nutritifs mobiles et immobiles dans le sol 	<ul style="list-style-type: none"> • tient compte des avantages résiduels des épandages initiaux durant la phase d'accroissement • donne la meilleure garantie que le rendement ne sera pas limité par les éléments nutritifs • dans les champs avec des dosages dans la gamme qui procure des gains pour la culture, des doses supérieures peuvent provoquer un gain de rendement supérieur à ce qui était prévu en fonction des résultats des analyses de sol
enjeux	<ul style="list-style-type: none"> • type de recommandation permettant difficilement de prévoir avec précision la dose la plus économique dans un contexte particulier, car les gains de rendement peuvent varier selon le type de sol, les méthodes de travail du sol, la variabilité dans le sol, le cultivar et la météo • type de recommandation assorti d'un risque plus grand de sous-fertilisation, en particulier dans les champs qui ont des résultats d'analyse de sol extrêmement variables 	<ul style="list-style-type: none"> • type de recommandation qui s'applique uniquement aux éléments nutritifs immobiles et qui ne convient donc pas à l'azote • type de recommandation qui oblige à amortir les coûts de fertilisation sur plusieurs années afin d'en bénéficier pleinement sur le plan économique • les conditions particulières au site ou les pratiques agricoles auront un effet sur la rentabilité liée à l'accroissement et au maintien des résultats d'analyse au niveau critique ou au-delà • type de recommandation assorti d'un risque plus grand de fertilisation excessive et de pertes d'éléments nutritifs ou d'épandage d'éléments nutritifs

Tableau 7-4. Quel type de recommandation choisir

Comme dans tout système biologique, l'incertitude est un facteur omniprésent. Il est impossible de prédire exactement la manière dont les rendements réagiront à des facteurs ou à des changements spécifiques concernant les prix des marchandises et de l'engrais. Toutefois, il existe des facteurs qui favorisent chaque système.

Facteurs favorables à la pondération en fonction d'une fertilisation suffisante	Facteurs favorables à la pondération en fonction de l'accroissement et du maintien de la fertilité du sol
<ul style="list-style-type: none">• tenure de courte durée, contrats de location annuels• volonté de ne pas dépenser plus qu'il ne faut• culture de peu de valeur et prix élevé des engrais• autres possibilités d'investissement procurant de meilleurs taux de rendement• éléments nutritifs sujets à des pertes dans le sol• rendement limité par des raisons autres que la fertilité• prévision de stabilité de la valeur des cultures et des prix des engrais• disponibilité du matériel et capacité de fertiliser directement chaque culture chaque année	<ul style="list-style-type: none">• tenure de longue durée• volonté de s'assurer que la fertilité n'est pas un facteur limitatif• cultures à valeur élevée et à rendement élevé qui réagissent à des doses plus élevées d'engrais• absence d'une meilleure possibilité d'investissement des capitaux ou d'achat de matériel• disponibilité de sources économiques d'éléments nutritifs, tels que fumier ou biosolides• éléments nutritifs conservés dans les sols sous des formes assimilables sans pertes appréciables ou conversion en formes non assimilables• prévision d'une hausse de la valeur des cultures et des prix des engrais• cultures comprises dans la rotation exigeant un haut niveau de fertilité du sol• volonté de souplesse pour omettre des épandages les années où le prix des engrais est élevé ou lorsque les conditions météorologiques rendent l'épandage difficile

Une fertilisation suffisante vise à combler les besoins de la culture en cours. Les recommandations de fertilisation pour l'Ontario de même que celles qui sont formulées par certains États américains voisins, dont l'État de New York, sont basées sur cette approche. Elle tient compte de la quantité d'éléments nutritifs assimilables dans le sol en fonction d'une analyse de sol. Les recommandations concernant l'engrais épandu visent à procurer des retombées optimales de la valeur accrue de la culture actuelle. Il s'agit du type de recommandations qui est privilégié pour les éléments nutritifs, comme l'azote, qui sont sujets à des pertes dans le sol. Ce type de recommandation peut aussi être utilisé pour d'autres éléments nutritifs, notamment le phosphore et le potassium.

Hausser le résultat d'analyse jusqu'à un objectif précis n'est pas le but de cette méthode, puisque c'est la réponse de la culture à l'ajout d'éléments nutritifs qui

est jugée importante. De plus fortes doses d'engrais sont recommandées dans les sols pauvres et de plus faibles doses, dans les sols riches. Cette méthode tend donc à hausser les faibles résultats d'analyse du sol et à abaisser ceux qui sont plus élevés. La rapidité à laquelle ces changements surviennent dépend des rendements de la culture (c.-à-d. le prélèvement par la culture) et peut être particulière à un champ ou à un emplacement.

L'autre type de recommandations vise l'accroissement et le maintien de la fertilité du sol plutôt qu'une réaction immédiate des cultures. Dans la phase d'accroissement, des engrais sont épandus pour accroître ou améliorer les résultats des analyses de sol à un niveau critique où la croissance de la culture ne sera vraisemblablement pas limitée par les éléments nutritifs. La phase de maintien nécessite d'ajouter des éléments nutritifs pour remplacer ceux prélevés par la culture en fonction d'estimations

du prélèvement par la culture et de la quantité d'engrais nécessaires pour modifier les résultats des analyses de sol. Lorsque les concentrations d'éléments nutritifs dans le sol sont supérieures aux fourchettes cibles, les doses recommandées tombent à zéro.

Les avantages d'investir dans l'accroissement et le maintien de la fertilité du sol ne se font pas tous sentir en un an. Alors que les coûts et les retours sur l'investissement liés à l'ajout d'engrais au cours d'une seule année peuvent uniquement justifier la fertilisation jusqu'à 90 % à 95 % du rendement maximal, le fait d'ajouter les retours sur l'investissement à la fertilité résiduelle sur une période de temps beaucoup plus longue pourrait potentiellement justifier une fertilisation jusqu'à un pourcentage plus élevé du rendement maximal (Reetz et Fixen, 1992), pourvu que l'augmentation du rendement soit suffisante pour justifier le coût plus élevé de l'engrais. Les études qui comparent les différentes approches sur plusieurs années concluent généralement à peu de différence des rendements entre les diverses recommandations, les coûts plus élevés d'engrais étant associés à l'approche de l'accroissement et du maintien de la fertilité des sols (Olsen et coll., 1982; Murdock, 1997).

Il est important d'examiner tous les coûts de cette approche, notamment de l'amortissement de l'investissement sur plusieurs années. Le coût de l'investissement comprend à la fois les frais d'intérêt et les coûts d'opportunité. Si d'autres possibilités de placement pouvaient procurer de meilleurs rendements, il serait plus avantageux de renoncer aux apports d'engrais destinés à accroître la fertilité du sol.

L'approche d'accroissement et de maintien de la fertilité des sols est utilisée par plusieurs laboratoires commerciaux, étatiques et universitaires, notamment en Pennsylvanie, en Ohio, au Michigan et en Indiana. Des différences notables entre les recommandations présentées par les laboratoires peuvent survenir à l'aide de cette approche. Les hypothèses utilisées pour l'accroissement de la fertilité par unité d'engrais et le temps nécessaire à cet accroissement se répercuteront sur les recommandations. Les résultats initiaux des analyses de sol peuvent aussi avoir un effet sur le taux de variation des analyses de sol quant à la quantité d'éléments nutritifs ajoutés comme engrais ou retirés du rendement de la culture par le sol. Des analyses de sol effectuées régulièrement demeurent un important outil de gestion des éléments nutritifs parallèlement à l'approche d'accroissement et de maintien de la fertilité des sols.

Base des recommandations visant la suffisance de fertilisation pour le maïs en Ontario

Le tableau 7-5 compare les recommandations actuelles du MAAARO relatives au phosphore pour le maïs avec prévisions de besoins en phosphore en fonction de 78 essais de réponse au phosphore chez le maïs réalisés en Ontario (1969-2010). Les données illustrent que les recommandations actuelles en matière de suffisance offrent pour la plus grande partie une fertilisation optimale de la culture.

Tableau 7-5. Comparaison de la recommandation pour la suffisance de fertilisation à la régression prévue de la dose économique maximale de phosphore

Analyse du P dans le sol (Olsen) (ppm)	Recommandation pour la suffisance (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	Recommandation pour la régression prévue (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)
de 0 à 3	110	110
de 4 à 5	100	60
de 6 à 7	90	40
de 8 à 9	70	30
de 10 à 12	50	10
de 13 à 15	20	10
de 16 à 20	20	10
de 21 à 30	20	10
de 31 à 60	0	10
>60	0	0

(Source : Janovicek et coll., 2015)

Exemple de types de pondération des résultats d'analyse de sol utilisant les approches de suffisance et d'accroissement et de maintien de la fertilité des sols

La figure 7-3 fournit des exemples de courbes de rendement du maïs pour trois concentrations différentes de phosphore dans le sol (sur des parcelles d'essais différentes). L'agent d'extraction utilisé pour le dosage du phosphore était le bicarbonate de sodium. Les doses les plus économiques ont été calculées sur un prix de 170 \$ par tonne de maïs et un prix de l'engrais de 1,20 \$ par kilogramme d'engrais à base de phosphore (P₂O₅).

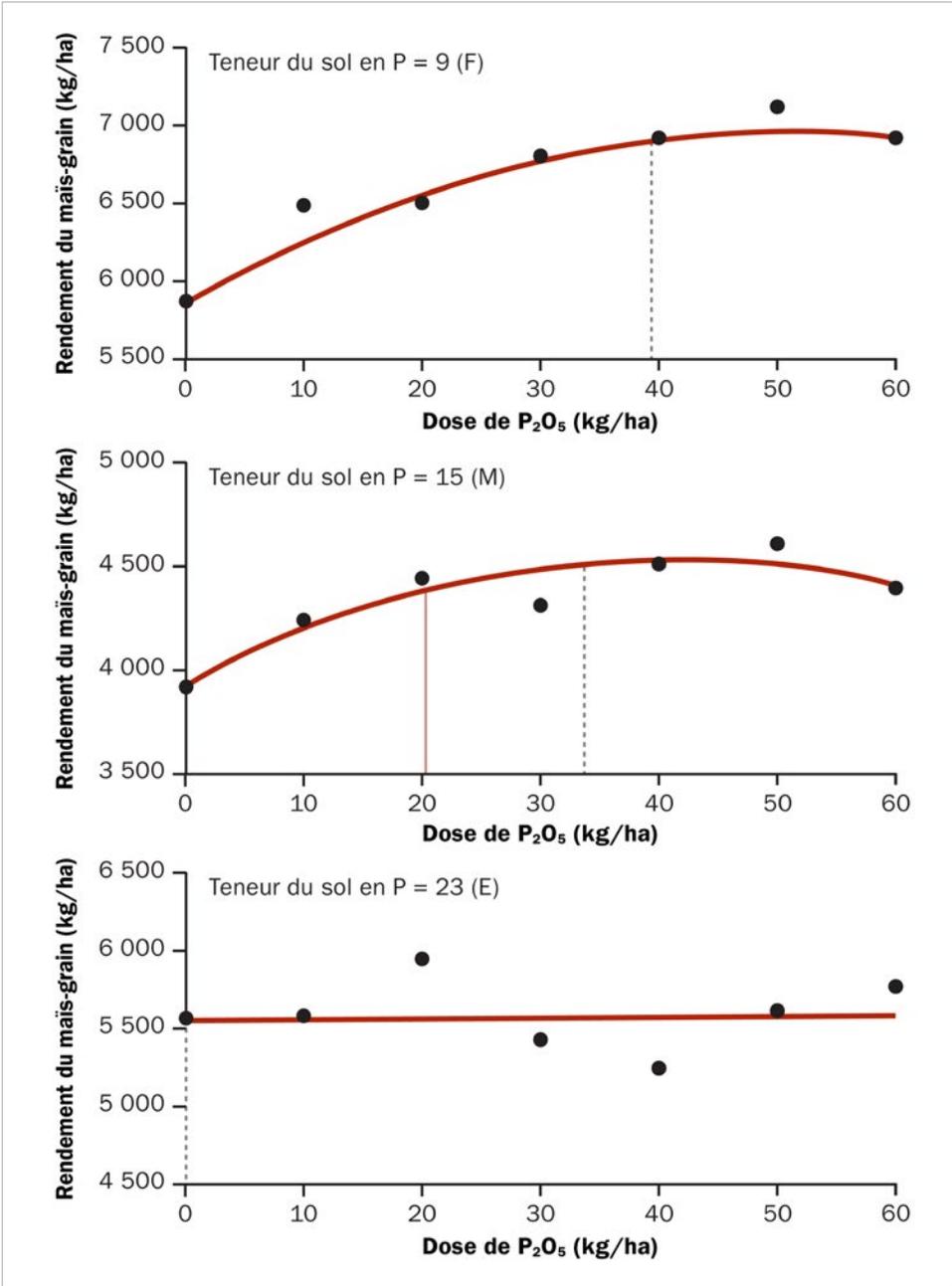


Figure 7-3. Courbes de rendement du maïs obtenues à partir des résultats d'essais menés à trois emplacements en Ontario dans des sols ayant des teneurs en phosphore différentes. Les lignes verticales indiquent la dose la plus économique à l'aide d'un modèle de régression quadratique (pointillées) ou quadratique à plateau (solides).

Tableau 7–6. Comparaison des recommandations pour le phosphore découlant de différentes approches en fonction de la figure 7–3

Teneur du sol en P (ppm)	Accroissement et maintien		Dose économique maximale		Recommandation actuelle pour l'Ontario (suffisance)*	
	P ₂ O ₅ (kg/ha)	Rendement (kg/ha)	P ₂ O ₅ (kg/ha)	Rendement (kg/ha)	P ₂ O ₅ (kg/ha)	Rendement (kg/ha)
9	120	1 062	39	1 056	70	1 062
15	64	553	21	528	20	519
23	55	0	0	0	20	0

* Publication 811F du MAAARO, *Guide agronomique des grandes cultures* (2017)

Doses économiques maximales

En se basant uniquement sur l'approche de suffisance, d'après les données de l'année en cours, on obtiendrait les doses économiques maximales d'engrais à base de phosphore indiquées au tableau 7–6.

Ce tableau n'est qu'un exemple. Il faut mener un nombre beaucoup plus grand d'expériences pour créer un tableau complet de recommandations. Pour le même niveau de fertilité du sol, les courbes de rendement peuvent varier selon le type de sol. C'est ce qui explique que les recommandations visant les trois emplacements choisis dans l'exemple s'écartent un peu des recommandations courantes.

Les recommandations courantes sont pondérées en fonction d'une fertilisation suffisante, mais elles prévoient des marges qui tiennent compte de la variabilité du sol et des réactions des cultures aux engrais de démarrage, en particulier pour le phosphore. Elles reposent sur un nombre bien plus considérable d'expériences que dans l'exemple et doivent donc être utilisées comme directives générales.

Résultat d'analyse du sol critique

À l'aide des données de réponse du phosphore pour le maïs provenant de la même source utilisée pour l'exemple portant sur l'approche en matière de suffisance à la figure 7–3, la figure 7–4 présente le rendement relatif du maïs sans apport d'engrais comme pourcentage du rendement du maïs avec engrais. La ligne horizontale est tracée à 95 %, ce qui correspond au rendement relatif choisi comme économiquement réalisable. La ligne verticale est tracée de manière à laisser le moins de points possibles dans les quadrants B et D. Cette ligne représente le niveau critique.

Dans ce cas, un niveau critique de 16 ppm est préconisé. Avec l'approche d'accroissement et de maintien, au-dessus de ce seuil des doses de maintien seraient uniquement recommandées. En deçà de ce seuil, la quantité d'engrais recommandée est celle nécessaire pour hausser le résultat d'analyse du sol, plus le maintien (consultez la figure 7–5). Les doses recommandées varieront selon la durée prévue pour l'accroissement du niveau de fertilité du sol.

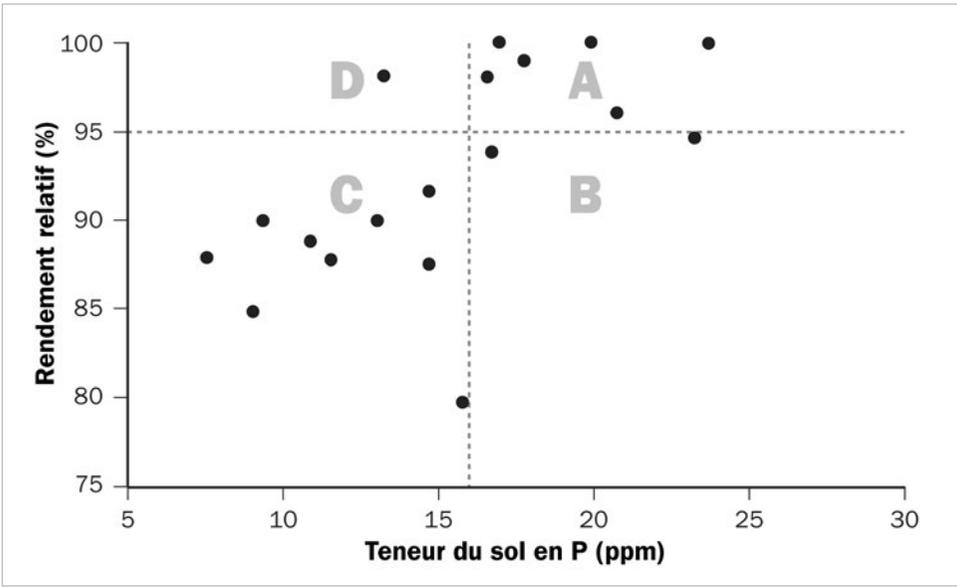


Figure 7-4. Détermination du niveau critique de l'analyse de sol

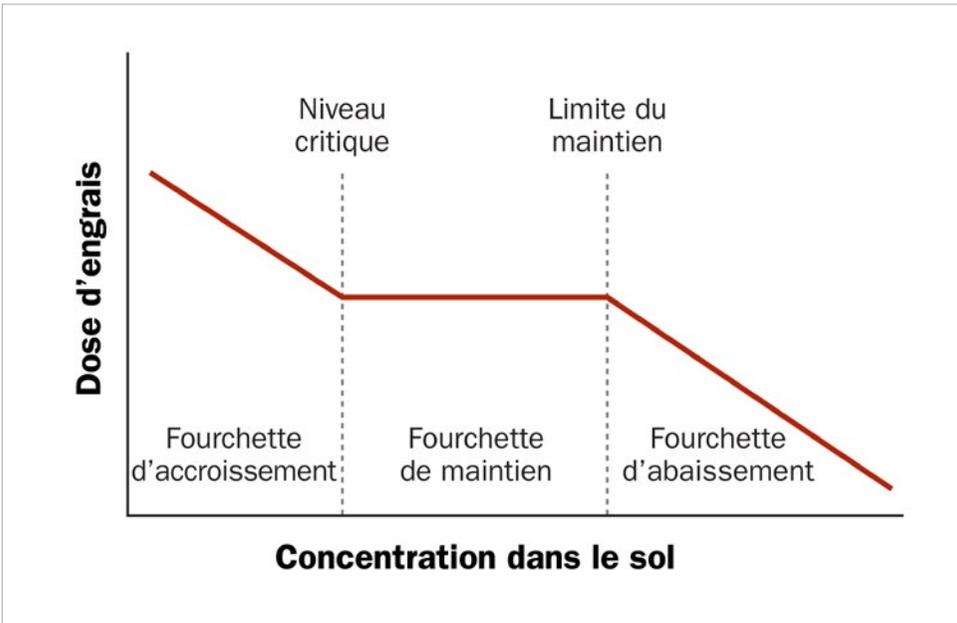


Figure 7-5. Pondération en fonction de l'accroissement et du maintien de la fertilité du sol

Hypothèses et calculs

Le tableau 7-6 donne un exemple de recommandations pondérées en fonction de l'accroissement et du maintien de la fertilité du sol. Ce type de recommandations repose sur trois hypothèses :

- Il faut 37 kg de P_2O_5 /ha pour augmenter de 1 ppm la concentration de cet élément nutritif dans le sol (Richards et coll., 1995).
- Il faut quatre ans pour porter le niveau de fertilité du sol au niveau critique.
- La dose de maintien est égale au prélèvement prévu par la culture qui est de 55 kg de P_2O_5 /ha (en fonction d'environ 150 boisseaux par acre ou de 9,4 tonnes par hectare d'une culture de maïs).

La figure 7-6 illustre le calcul pour parvenir à la recommandation pour le phosphore. Dans cet exemple, le niveau existant de fertilité du sol est de 9 ppm. Pour calculer la dose recommandée, on soustrait de la concentration cible de 16 ppm, la concentration présente dans le sol, soit 9 ppm. On multiplie ensuite le résultat par la quantité nécessaire pour hausser la concentration d'une unité (37 kg P_2O_5 /ha), divisé par le nombre d'années auquel on ajoute la dose de maintien (55 kg P_2O_5 /ha). La dose de maintien devrait refléter la productivité globale du site, même si la recherche a démontré que le prélèvement de phosphore par la culture ne prédit pas très bien les changements dans les résultats d'analyse de P pour un large éventail de sols (Alvarez et Steinbach, 2017). Cela peut refléter des différences inhérentes entre les sols en ce qui concerne les quantités et les formes de phosphore dans le sol qui contribuent aux réserves assimilables par les végétaux sur de longues périodes de temps. Cela peut aussi refléter le fait que les végétaux utilisent le phosphore plus profondément

enfoui dans le profil du sol que la profondeur de l'échantillon de sol de 15 cm (6 po).

$$(16 - 9) \cdot 37 \div 4 + 55 = 120$$

Le diagramme illustre le calcul de la dose recommandée de phosphore. L'équation est $(16 - 9) \cdot 37 \div 4 + 55 = 120$. Les termes sont expliqués : 16 est la concentration cible, 9 est la concentration existante, 37 est le P_2O_5 nécessaire pour élever le résultat d'une unité, 4 est le nombre d'années, et 55 est le maintien nécessaire. Le résultat final est la dose recommandée de 120 kg P_2O_5 /ha.

Figure 7-6. Calcul du besoin pour l'accroissement et le maintien de la fertilité du sol

Les quantités d'engrais dans le tableau 7-6 pour l'accroissement et le maintien de la fertilité sont supérieures à celles utilisées dans le cadre de l'approche en matière de suffisance, même si les mêmes données sont utilisées. La justification économique de ces doses est une question assez complexe et ne s'applique pas à toutes les situations. La différence de rendement entre la culture à la concentration critique ou au-dessus de cette dose et le rendement obtenu à l'aide de la dose la plus économique à une concentration plus faible détermine la rentabilité nette de l'approche en matière d'accroissement et de maintien de la fertilité.

En pratique, les épandages de maintien sont recommandés par rapport à un éventail de concentrations. Au-delà des fourchettes prévues, les doses commencent à décliner.

Le maintien de la fertilité du sol dépend des prélèvements effectués par la culture et n'a pas d'incidence directe sur la réaction de la culture. Par conséquent, la dose de maintien doit reposer sur un rendement moyen de la culture pour le champ, plutôt que sur un objectif de rendement.

Tableau 7-7. Moyenne du coût de l'engrais et du rendement de la culture des recommandations pour le phosphore en fonction de différentes approches basées sur la figure 7-3 pour les 4 premières années du programme

Teneur du sol en P (ppm)	Accroissement et maintien			Dose économique maximale			Recommandation actuelle pour l'Ontario*		
	Coût de l'engrais (ha/an)	Rendement (ha/an)	Profit** (/ha/an)	Coût de l'engrais (ha/an)	Rendement (ha/an)	Profit** (/ha/an)	Coût de l'engrais (ha/an)	Rendement (ha/an)	Profit** (/ha/an)
9	144 \$	180,50 \$	36,50 \$	46,80 \$	179,50 \$	132,70 \$	84 \$	159,20 \$	75,20 \$
15	76,80 \$	94 \$	17,2 \$	25,20 \$	89,80 \$	64,60 \$	24 \$	77,80 \$	53,80 \$
23	66 \$	0 \$	-66 \$	0 \$	0 \$	0 \$	24 \$	0 \$	-24 \$

* Publication 811F du MAAARO, *Guide agronomique des grandes cultures* (2017)

** Le profit est uniquement basé sur la réponse à l'engrais et est calculé comme la différence entre la valeur de la culture (170 \$/tonne) et le coût de l'engrais (1,20 \$/kg P₂O₅).

Comparaison

Le tableau 7-7 présente la moyenne des coûts et des rendements sur investissement annuels des différents programmes au cours des 4 premières années (la phase d'accroissement), illustrant le revenu supplémentaire qui doit être produit pour couvrir le coût initial de l'augmentation des concentrations de P dans le sol. Des comparaisons directes de ces deux approches sur plusieurs années montrent souvent peu de différence dans les rendements, mais des coûts plus élevés d'engrais avec les recommandations pour l'approche d'accroissement et de maintien de la fertilité fournis par des laboratoires ou des consultants individuels (Olsen et coll., 1982; Murdock, 1997). Les recommandations qui incluaient des épandages d'oligo-éléments et d'éléments nutritifs secondaires présentaient aussi des coûts beaucoup plus élevés d'engrais, sans avantage observé en matière de rendement (Olsen et coll., 1982).

La figure 7-7 illustre la rentabilité potentielle à long terme de ces approches pour l'épandage de phosphore relativement à la recommandation actuelle. Les profits initiaux sont supérieurs avec la méthode de l'approche la plus économique, diminuent avec le temps en raison de la fertilisation

insuffisante alors que les concentrations de P dans le sol diminuent entre les périodes d'échantillonnage du sol. Dans le cas de l'approche d'accroissement et de maintien, le profit est moins important durant la phase d'accroissement et demeure plus faible pendant plusieurs décennies. Cette période de temps serait plus longue si du crédit était donné à l'intérêt potentiellement gagné sur le capital non investi dans des engrais pour accroître le niveau de l'analyse du sol.

À l'aide de l'approche de la dose la plus économique, la concentration dans le sol devrait diminuer à une valeur d'environ 8 ppm. Avec l'approche d'accroissement et de maintien, le dosage resterait à 16 ppm, alors que la recommandation actuelle le ferait fluctuer entre 9 et 11 ppm. Le lecteur est avisé que l'exemple qui précède est basé sur un jeu de données limité et que les résultats varieraient vraisemblablement selon l'emplacement. Les résultats appuient cependant les recherches publiées à ce jour qui n'ont conclu à aucun avantage économique associé à l'approche d'accroissement et de maintien, principalement en raison des coûts supérieurs des intrants sans effet notable sur les rendements.

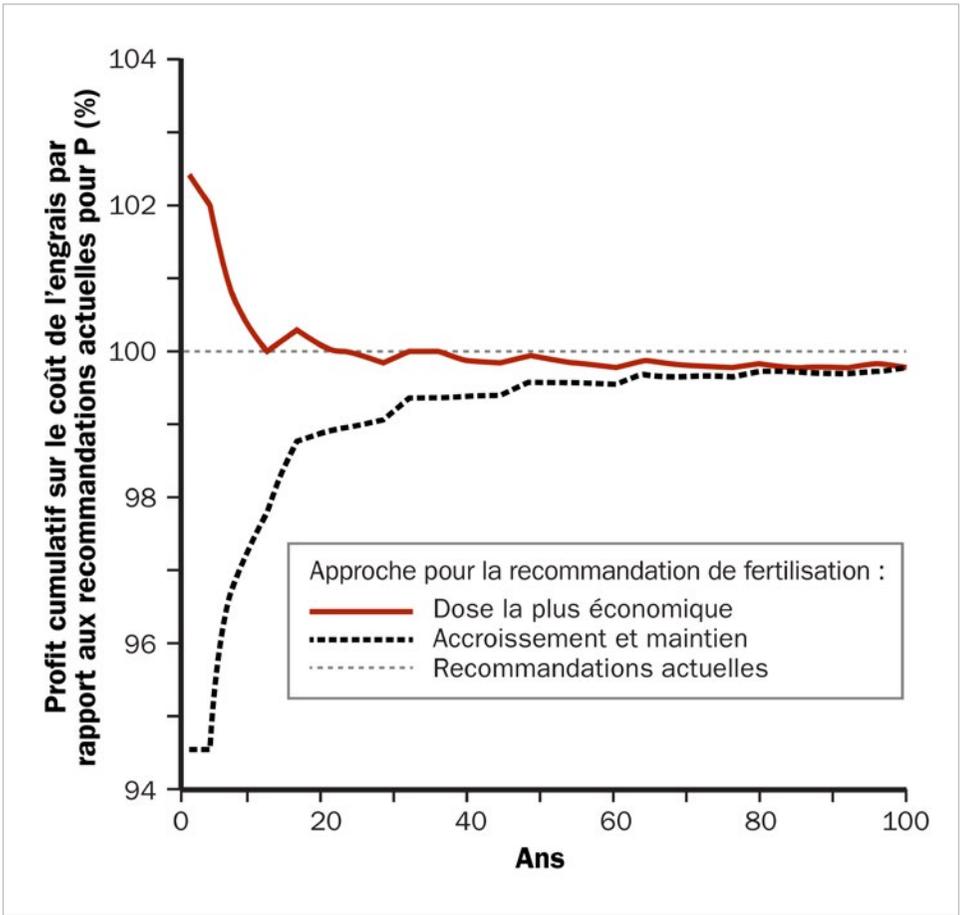


Figure 7-7. Comparaison des profits associés aux approches à la fertilisation par rapport aux recommandations ontariennes actuelles

On présume que les rendements respectent la courbe de rendement observée à la figure 7-3 et le rendement relatif de la figure 7-8. L'approche d'accroissement et de maintien était supposée donner le rendement maximal prévu chaque année, alors que les rendements prévus pour les deux autres approches variaient en fonction des changements du dosage et du taux d'épandage d'engrais, comme l'illustre la figure 7-9. Il importe de remarquer que dans la figure 7-9, le gain de rendement après l'épandage de phosphore diminue lorsque la concentration de P dans le

sol augmente. Pour simplifier l'exemple, le revenu supplémentaire lié à l'intérêt potentiel sur le capital utilisé pour acheter l'engrais dans le cadre de l'approche d'accroissement et de maintien n'a pas été tenu pour compte. Voici les autres hypothèses retenues : analyse du sol effectuée chaque 5 ans; résultats d'analyse du sol de P modifiés en fonction de la quantité de P prélevée par la culture (55 kg P_2O_5 /ha/an) ou ajoutée comme engrais; coût de l'engrais de 1,20 \$/kg de P_2O_5 et valeur du maïs de 170 \$/tonne.

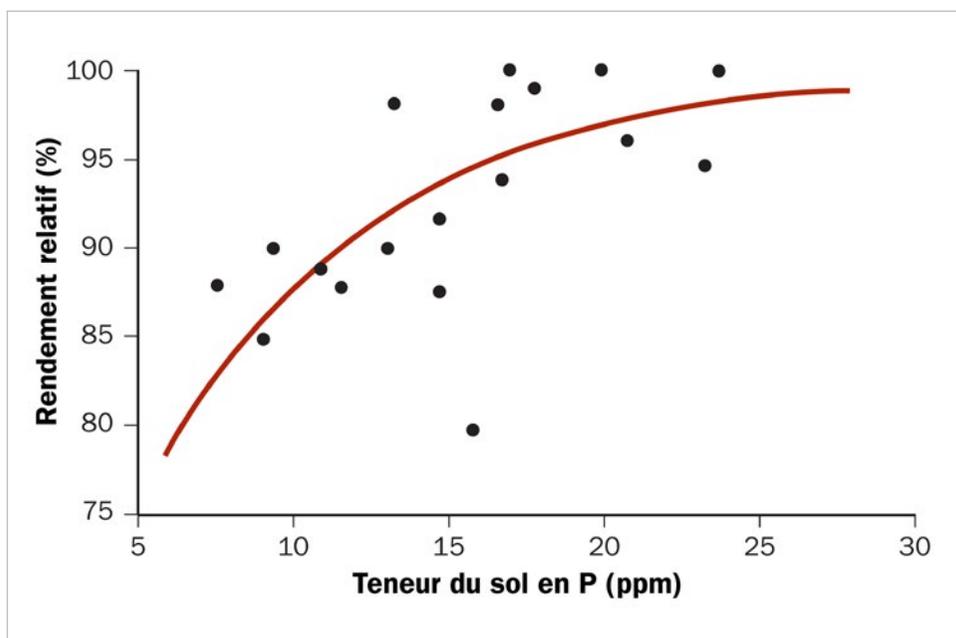


Figure 7-8. Rendement relatif à différentes concentrations

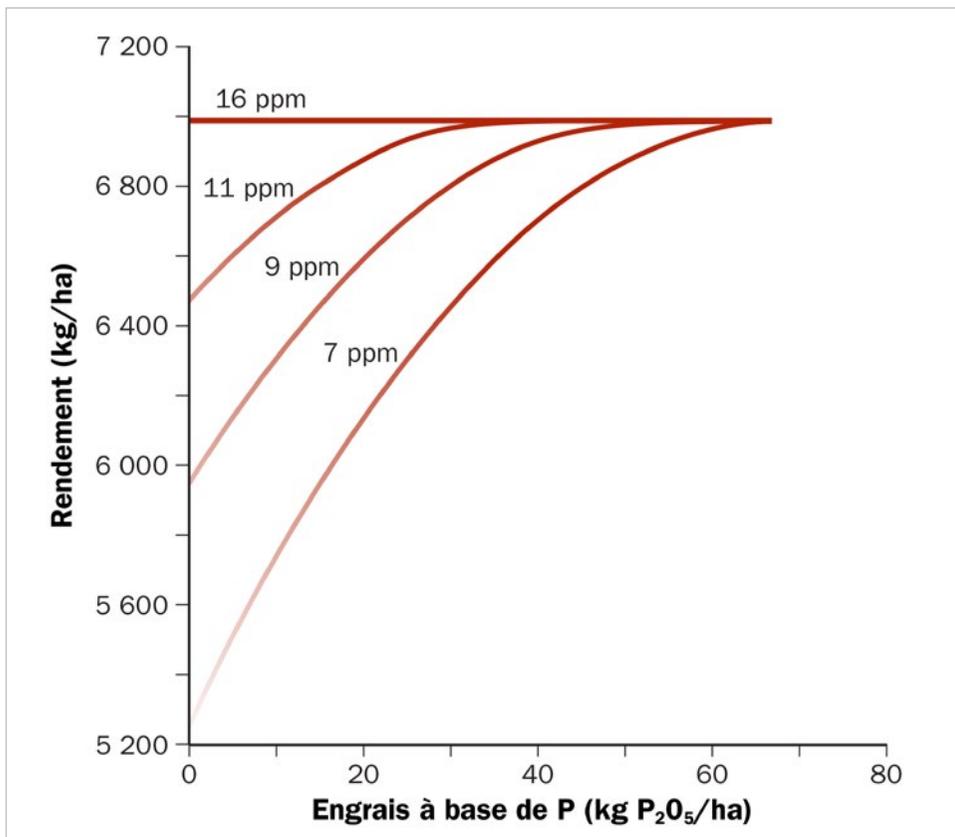


Figure 7-9. Effet prévu des changements de concentration de P sur la réponse de la culture à l'épandage d'engrais à base de P. **Remarque :** Les chiffres sur les courbes indiquent la concentration de P.

Autres points à considérer

Objectif de rendement

Les rendements attendus ont souvent été utilisés pour prendre des décisions en matière de dosage d'engrais. À l'évidence, le rendement final est ce qui paie pour les coûts d'intrants. Les cultures qui ont une plus grande valeur ont donc tendance à recevoir une plus grande quantité d'engrais puisque la réponse de la culture n'a pas à être aussi importante pour couvrir les dépenses pour de l'engrais. Le fait de baser les doses d'épandage d'engrais sur le prélèvement par la culture entraînera clairement des doses d'épandage plus élevées lorsque les rendements augmentent, mais cela n'est pas nécessairement synonyme d'un

besoin d'engrais plus grand de la culture. Il existe peu de preuves scientifiques pour appuyer la relation directe entre l'objectif de rendement et le besoin d'engrais. Il faut cependant savoir que les variétés, hybrides et cultivars les plus récents prélèvent potentiellement plus efficacement toutes les ressources qu'ils peuvent assimiler (c.-à-d. eau, lumière et éléments nutritifs dans le sol ou l'engrais) pour produire un rendement (Mueller et Vyn, 2016). En ce qui concerne l'apport d'engrais azoté, le gain en rendement découlant de l'épandage d'azote est beaucoup mieux corrélé au besoin en engrais azoté que le rendement absolu ou l'objectif de rendement de la culture (Lory et Scharf, 2013; Kachanoski et coll., 1996).

À long terme, les forts rendements s'accompagnent de prélèvements plus importants d'éléments nutritifs dans le sol, ce qui oblige à faire des apports plus importants d'engrais pour maintenir les résultats d'analyse du sol. L'analyse régulière du sol surveillera les changements de concentration dans la couche retournée. Les sols possédant un fort potentiel de rendement ont une couche arable épaisse et une excellente structure. Les racines s'y développent aisément, de sorte qu'elles prélèvent de plus gros volumes d'eau et d'éléments nutritifs. Étant donné que les racines des végétaux prélèveront les éléments nutritifs sous la couche de 15 cm où l'échantillon de sol à analyser est prélevé, il faut s'attendre à ce que les épandages basés sur le prélèvement par la culture augmentent légèrement les résultats d'analyse du sol.

Le gain de fertilité n'est qu'un élément du rendement de la culture. Par exemple, une recherche menée au campus Ridgetown a enregistré un rendement du maïs de 18,4 tonnes par hectare (293 boisseaux par acre) en 1985 sur des parcelles de recherche situées près de Chatham (Stevenson, 1983). Plusieurs facteurs participent à ce rendement élevé, notamment les propriétés inhérentes au sol, l'irrigation et les éléments nutritifs contenus dans les apports importants d'engrais et d'éléments nutritifs du fumier. Les chercheurs croyaient cependant que les facteurs les plus importants étaient la sélection d'hybride et de population.

Pourcentages et ratios de saturation en bases

Les ratios ou pourcentages d'éléments nutritifs qui sont des cations basiques (calcium [Ca], magnésium [Mg] et potassium [K]) servent parfois d'indicateurs de la biodisponibilité de ces éléments nutritifs. Il s'agit de reconnaître les interactions entre les cations.

Ces cations basiques sont réputés avoir des effets antagonistes les uns sur les autres. C'est dire qu'une très forte teneur du sol en un cation peut nuire à la biodisponibilité de l'un des autres. En pratique, toutefois, les interactions entre éléments nutritifs ne sont importantes que lorsque la concentration de l'un des éléments nutritifs avoisine la carence.

La notion de saturation en bases remonte aux années 1940; on la doit à des chercheurs du New Jersey (Bear et coll., 1945). Dans une série d'expériences réalisées en serre sur une période de huit ans, ces derniers ont chaulé et fertilisé des sols acides, infertiles, pour y faire pousser de la luzerne, et la saturation en bases a été mesurée. Les chercheurs suggéraient que le complexe d'échange cationique devait être occupé par 65 % de calcium, 10 % de magnésium, 5 % de potassium et 20 % d'hydrogène. Il est important de signaler que, même si la culture a bien poussé grâce à ces niveaux d'éléments nutritifs dans le sol, il n'est pas nécessairement indispensable de retrouver des proportions identiques pour assurer la croissance des cultures.

De nombreux essais menés depuis l'étude initiale ont permis de constater qu'un vaste éventail de ratios Ca:Mg:K ou de pourcentages de ces éléments ne compromet nullement la croissance des cultures tant qu'il n'y a pas carence de l'un de ces éléments nutritifs. Selon une étude portant sur la luzerne et le lotier corniculé réalisée dans l'État de New York, des ratios Ca:Mg allant de 267:1 à 1:1 n'avaient aucun effet important sur les rendements (Reid, 1996).

Il y a deux principaux inconvénients à utiliser les ratios ou les pourcentages de saturation en bases pour élaborer des recommandations de fertilisation :

- Ces recommandations ne tiennent compte d'aucune analyse économique

qui serait pourtant pertinente surtout dans les sols riches en calcium et en magnésium. Ces programmes de fertilisation peuvent être extrêmement coûteux.

- Bien des sols alcalins de l'Ontario regorgent de minéraux carbonés. L'agent d'extraction utilisé lors de l'analyse de sol risque de dissoudre ces minéraux, de provoquer la libération du calcium et du magnésium dans l'extrait. Cela exagèrera la CEC calculée et les pourcentages de calcium et de magnésium, ce qui peut donner lieu à des apports recommandés de potassium qui sont exagérément élevés.

La notion de ratio de saturation en bases a néanmoins le mérite de reconnaître les extrêmes dans les ratios entre cations, particulièrement dans les sols dont la CEC et la fertilité sont très faibles. Le potassium en particulier peut nuire au prélèvement du magnésium. Il faut donc être vigilant lorsque les analyses révèlent des sols riches en potassium et pauvres en magnésium, de manière à garantir des réserves suffisantes de magnésium dans le sol. Cette interaction joue aussi un rôle dans la maîtrise de problèmes nutritionnels chez les ruminants, comme la tétanie d'herbage.

Réglage des doses recommandées de potassium en fonction de la capacité d'échange cationique (CEC)

Certains États américains modifient la dose recommandée de potassium en fonction de la CEC. Au Michigan, en Ohio et en Indiana, les doses recommandées de potassium augmentent de pair avec la CEC. Cette pratique repose sur des essais menés dans le sud de l'Ohio. Les sols argileux de cette région peuvent fixer des quantités appréciables de potassium. Les besoins en potassium sont donc plus grands dans les sols à texture lourde, à la fois pour un rendement optimal

et pour accroître les concentrations de potassium dans le sol. Les argiles des sols jeunes du nord de l'Ohio renferment davantage de potassium natif et ne fixent pas le potassium aussi facilement. Dans ces sols, la teneur en argile ou la CEC n'ont que peu d'effet sur la quantité de potassium nécessaire.

Dans l'État de New York, pour une concentration donnée de potassium dans le sol, les doses recommandées de cet élément sont plus fortes si les sols sont sableux et que la CEC est faible. La recherche a démontré que les sols à plus forte teneur en argile libèrent davantage de potassium par météorisation, de sorte que les cultures ont moins besoin d'engrais potassiques pour offrir un rendement optimal.

Les recherches menées en Ontario n'ont pas permis d'observer d'effet appréciable de la CEC sur la dose de potassium nécessaire.

Variabilité spatiale

La détermination des doses d'engrais se fait normalement sur de petites parcelles où la fertilité du sol est relativement uniforme. Or, la plupart du temps, les concentrations d'éléments nutritifs dans les sols varient considérablement à la grandeur des champs. Les champs de l'Ontario qui ont été intensément échantillonnés présentent un coefficient de variation de 18 % à 54 % pour les nitrates, de 20 % à 140 % pour le phosphore, de 12 % à 70 % pour le potassium et de 50 % à 60 % pour les oligo-éléments.

Cette variation des résultats d'analyse signifie que cette partie du champ présente une fertilité supérieure à la moyenne et une réponse inférieure à la moyenne à l'engrais épandu. Une autre partie du champ avait une fertilité inférieure à la moyenne et une réponse supérieure à la moyenne à l'apport d'engrais.

Le gain en rendement découlant d'un apport supplémentaire d'engrais sur les zones présentant de faibles résultats d'analyses est généralement plus élevé que le coût de l'engrais supplémentaire épandu sur les zones présentant des résultats d'analyses élevés. Plus le champ présente une variabilité importante, la partie qui répond grandement devient plus vaste par rapport à la partie du champ qui présente une réponse faible ou nulle. Le résultat net est que, dans les champs variables, la dose unique la plus rentable d'engrais à épandre sur tout le champ est supérieure au besoin pour un champ uniforme.

Le tableau 7-8 présente un exemple de l'effet de la variabilité des résultats d'analyse du sol sur la dose d'engrais optimale. Il importe de souligner que la variabilité spatiale augmente la dose optimale constante de potassium, en particulier dans les sols présentant des résultats d'analyse élevés.

La reproduction précise sur une carte de la variabilité de la fertilité du sol d'un champ permet d'obtenir les mêmes rendements avec des augmentations de doses moindres que celles qui sont indiquées dans le tableau. Cela peut être réalisé en utilisant une dose variable d'engrais sur les zones qui répondent le plus. Cependant, le prélèvement d'échantillons à raison de un échantillon par hectare ou acre risque de ne pas refléter fidèlement cette variabilité. La technologie permettant l'application de doses variables existe déjà, mais l'élaboration de cartes suffisamment précises pour ces applications constitue encore un défi.

Dans les champs où la fertilité est très variable, il est possible d'augmenter la rentabilité de la fertilisation en appliquant des doses variables, pourvu qu'une bonne partie du champ soit dans la fourchette d'analyses du sol réactives.

Tableau 7-8. Influence de la variabilité des résultats d'analyse du sol en K sur la dose optimale de K en Ontario

Dose moyenne de K ppm	Dose optimale de K ₂ O (kg/ha) à différents degrés de variabilité dans les résultats d'analyse du sol		
	Faible	Moyenne	Élevée
45	100	101	106
90	50	58	77
135	0	30	58

Source : Kachanoski et Fairchild, 1994. Le coefficient de variation est de 0 % pour une variabilité faible, de 53 % pour une variabilité moyenne et de 131 % pour une variabilité élevée.

Coût de la fertilisation insuffisante par rapport au coût de la fertilisation excessive

Dans les courbes de rendement (p. ex., figure 7-3), la pente diminue lorsque l'apport en engrais augmente. Par conséquent, le changement du rendement pour un pourcentage donné de fertilisation insuffisante est supérieur au changement du rendement pour la même quantité de fertilisation excessive (consultez le tableau 7-9).

En cas d'incertitude quant à l'exactitude d'une recommandation, le fait d'opter pour une fertilisation excessive entraîne des pertes de profit plus petites que celles qui découlent d'une fertilisation insuffisante. La différence réelle dépend de la forme de la courbe de rendement. Ce principe est d'autant plus vrai dans le cas d'éléments nutritifs comme l'azote, pour lesquels les gains de rendement sont relativement linéaires jusqu'à ce qu'un plateau soit atteint.

Dans le cas des éléments nutritifs qui sont nuisibles à l'environnement, comme l'azote et le phosphore, la fertilisation excessive pose cependant problème. Il est important de chercher à établir les recommandations avec un maximum de précision et de chercher par tous les moyens à recueillir de l'information sur une recommandation en particulier.

Tableau 7–9. Effet de la fertilisation insuffisante par rapport à la fertilisation excessive sur le rendement net sur l'investissement pour le maïs-grain

LÉGENDE : REMA = rendement économique maximal de l'azote

Dose d'engrais kg N/ha (lb N/acre)	Rendement t/ha (bu/acre)	Valeur de la culture	Coût de l'azote	Rendement net	Écart
90 (81) (⅓ de moins)	9,3 (148)	1 466 (594)	119 (48)	1 347 (545)	- 84 (34)
135 (121) (recommandée)	10,2 (163)	1 610 (652)	179 (73)	1 431 (579)	-
181 (161) (⅓ de moins)	10,7 (171)	1 687 (683)	239 (97)	1 448 (586)	+17 (7)
148 (132) REMA	10,7 (171)	1 686 (682)	196 (79)	1 490 (603)	+59 (24)

Hypothèses de prix : Maïs @ 4,00 \$/boisseau; N @ 0,60 \$/lb.

Dose d'azote recommandée par l'outil ontarien de calcul des apports d'azote dans le maïs. Les cultures précédentes comprenaient du maïs-grain, du soya, des haricots comestibles et des céréales. Les emplacements où des graminées fourragères, des légumineuses fourragères ou des cultures de couvertures avaient été auparavant cultivées ont été exclus.

Source : moyenne de 96 essais de dosage d'engrais azoté tirée de la banque de données sur l'apport en azote dans le maïs, 2005-2017.

Conséquences agronomiques et environnementales

Dans les conditions humides de l'est de l'Amérique du Nord, la quantité d'azote minéral qui reste dans le sol après la récolte est un indicateur fiable du risque de perte par lessivage ou par dénitrification. Les concentrations

de nitrates résiduelles après la récolte augmentent grandement lorsque les doses d'épandage dépassent la quantité exigée pour un rendement optimal. C'est ce que montre clairement la figure 7–10, lorsque le rendement atteint un plateau alors que la concentration d'azote résiduel dans le sol continue d'augmenter.

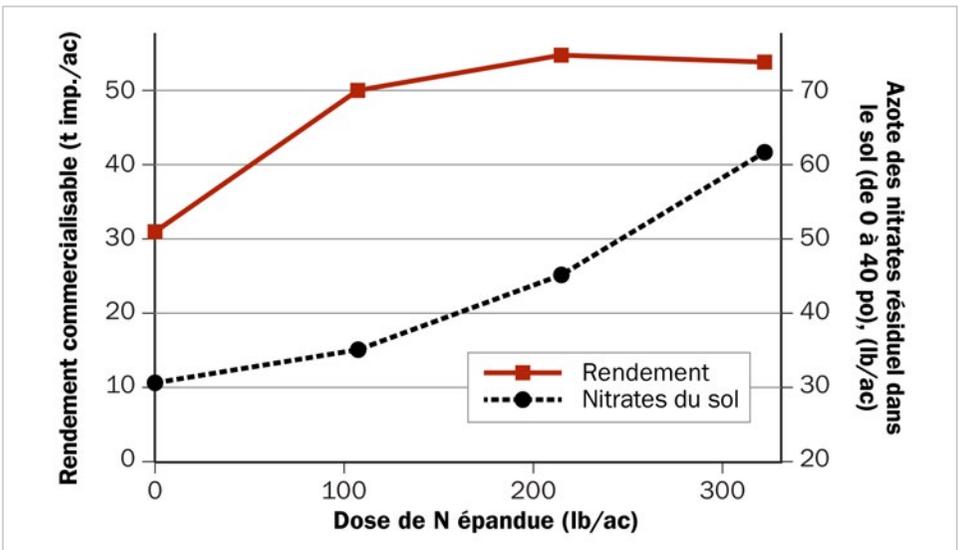


Figure 7–10. Réaction de la tomate à la fertilisation azotée. (L'utilisation des mesures impériales reflète les normes utilisées dans l'industrie.) Source : T.Q. Zhang, ministère de l'Agriculture et de l'Agroalimentaire, 2005.

Fertilisation à l'azote : dose, moment, conditions météorologiques et dates des semis

Étant donné que les conditions météorologiques ont un effet sur la dose à laquelle l'engrais azoté est perdu dans le sol, le besoin en azote et la dose à laquelle l'azote organique dans le sol est minéralisé et assimilable par les végétaux, il n'est guère étonnant que des variations annuelles existent dans les besoins en engrais de la culture et les réponses aux apports en azote. De récentes études (Tremblay et coll., 2012; Xie et coll., 2013; Kablan et coll., 2017) et des évaluations des données sur la réponse du maïs à un apport en azote réalisées dans des états voisins et au Québec suggèrent que la réponse à un apport en azote est plus grande dans les sols à texture fine que dans les sols à texture moyenne, et que les gains en rendement aux épandages d'azote durant la saison (épandages en bandes latérales) sont supérieurs en présence d'une pluviosité accrue.

La série d'études démontre que la variabilité d'une année à l'autre de la dose d'azote optimale dépend davantage de la distribution de la pluviosité que de la quantité globale de pluie ou d'unités thermiques, même si les unités thermiques demeurent importantes. Lors des saisons de croissances avec peu d'unités thermiques et des modèles de variabilité accrue de la pluviosité, les gains liés aux épandages d'azote durant la saison diminuent. Une pluviosité bien distribuée et des unités thermiques plus élevées entraînent des doses optimales supérieures d'épandage d'azote durant la saison. Des précipitations avant un épandage en bandes latérales semblent plus étroitement corrélées à des gains de rendement liés à un apport en azote que la pluviosité après un épandage en bandes. Des semis tardifs entraînent une plus grande variabilité des doses optimales d'azote que des semis effectués aux dates optimales.

L'épandage en bandes latérales et possiblement l'épandage fractionné d'azote pour le maïs peuvent être une façon de minimiser les pertes tout en permettant des rajustements de la dose d'engrais en fonction des conditions de la saison de croissance et des dates de semis. En présence d'épandages d'azote tardifs après un épandage en bandes latérales, le coût supplémentaire de l'épandage est un facteur important pour déterminer l'avantage économique global.

Élaboration de recommandations de fertilisation : l'outil de calcul ontarien des apports d'azote dans le maïs

Les recommandations ontariennes d'azote pour le maïs ont été mises à jour en 2006. Les données recueillies au cours de 41 ans d'essais portant sur l'azote et les courbes de rendement ont été soumises à de nouveaux calculs conformes à un modèle quadratique avec plateau. La dose optimale d'azote pour chaque site-année a été établie et les facteurs ayant les plus grandes répercussions sur les doses d'azote optimales ont été utilisés pour élaborer un modèle visant à prévoir les besoins en azote de champs en particulier.

Les facteurs pris en compte dans le modèle étaient le potentiel de rendement du champ (rendement moyen au cours des cinq dernières années), la texture du sol, la culture précédente, la fourchette d'unités thermiques, le moment de la fertilisation et le prix relatif du maïs et des engrais azotés.

Vous trouverez de plus amples détails sur l'outil de calcul ontarien des apports d'azote dans le maïs au www.gocorn.net (en anglais seulement).

Éléments nutritifs prélevés par la culture et enlevés par unité de rendement

Les prélèvements désignent les quantités maximales d'éléments nutritifs qu'une culture assimile pour les diffuser ensuite dans sa partie aérienne. L'enlèvement des

éléments nutritifs renvoie à la quantité d'éléments nutritifs qui sont enlevés du champ au moment de la récolte. Dans les cultures qui sont récoltées comme plantes entières (maïs d'ensilage, luzerne et chou), les deux sont presque équivalents.

Les quantités présentées dans les tableaux 7–10 et 7–11 sont basées sur des données d'exploitation ontariennes disponibles et sur les données générales propres à l'Amérique du Nord, lorsque les données locales étaient insuffisantes. Pour prévoir avec précision les apports d'éléments nutritifs nécessaires à une culture, il faut demander une analyse des tissus végétaux.

Les données relatives aux cultures fourragères sont propres à l'Ontario et correspondent aux fourchettes observées dans les échantillons qui ont été soumis aux fins d'analyse à la société Agri-Food Laboratories de Guelph pendant cinq ans au début des années 1990.

Tableau 7–10. Enlèvement des éléments nutritifs pour les grandes cultures en Ontario

LÉGENDE : — = données non disponibles

Culture	Unité	N*	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S
Céréales et oléagineux (à la teneur en eau lors de la mise en marché)							
maïs-grain	kg/t	11,5-17,7	6,6-7,9	4,6-5,2	0,12	1,55	1,2-1,3
	lb/bu	0,7-1,0	0,37-0,44	0,26-0,29	0,007	0,087	0,07
soya	kg/t	62,3-66,7	13,3-14,7	23,0-23,3	3,0-3,7	2,3-3,0	0,67
	lb/bu	3,7-4,0	0,80-0,88	1,38-1,40	0,18-0,22	0,14-0,18	0,033
blé d'automne	kg/t	19,1-20,9	9,1-10,4	5,78-6,22	0,44	2,67	1,33
	lb/bu	1,15-1,25	0,55-0,63	0,35-0,37	0,027	0,16	0,08
orge	kg/t	18,1-23,1	7,78-8,33	5,28-7,22	0,56	1,11	1,67
	lb/bu	0,87-1,11	0,37-0,40	0,25-0,35	0,027	0,053	0,08
avoine	kg/t	19,6-25,0	7,92	5,83-6,25	0,833	1,25	2,08
	lb/bu	0,63-0,80	0,253	0,19-0,20	0,027	0,04	0,067
seigle d'hiver	kg/t	19,3-21,8	6,07-8,21	6,07-6,43	1,07	1,43	1,79-3,57
	lb/bu	1,08-1,22	0,34-0,46	0,34-0,36	0,06	0,08	0,10
haricots secs	kg/t	83,3	27,8	27,8	2,22	2,22	5,56
	lb/bu	2,50	0,83	0,83	0,067	0,067	0,167
canola	kg/t	40,0-44,4	22,2-26,7	11,1-13,3	4,0-5,3	5,33-6,67	6,67
	lb/bu	2,0-2,2	1,11-1,33	0,56-0,67	0,20-0,27	0,27-0,33	0,33

* Le soya, les haricots secs et les légumineuses fourragères tirent la plus grande partie de leur azote de l'air.

** Les teneurs en éléments nutritifs dans la canne ou la paille récoltées sont extrêmement variables en raison de variations dans les méthodes de récolte (hauteur de coupe, méthode de collecte, moment de la récolte, etc.). Il est recommandé de procéder à des analyses des éléments nutritifs sur un sous-échantillon représentant la matière récoltée pour obtenir des estimations plus fiables de l'enlèvement des éléments nutritifs.

Fourchettes de prélèvement et d'enlèvement d'éléments nutritifs correspondant aux niveaux de rendement types de grandes cultures bénéficiant de bonnes conditions de croissance. Les valeurs reposent dans la mesure du possible sur des données recueillies sur le terrain en Ontario ainsi que sur des estimations. Les quantités d'éléments nutritifs prélevés et enlevés varient en fonction du rendement de la culture, alors que les concentrations d'éléments nutritifs varieront aussi en fonction de l'année, du niveau de fertilité du sol et de la variété de culture. Pour être précise, la planification de la gestion des éléments nutritifs exige une analyse annuelle de chaque culture. Les changements réels de fertilité du sol ne correspondent pas nécessairement aux quantités prélevées par la culture. Dans certains cas, la météorisation des matériaux du sol et de la matière organique peut compenser en partie la quantité d'éléments nutritifs prélevés par les cultures. Dans d'autres, les éléments nutritifs peuvent se lier chimiquement au sol ou être perdus par lessivage, de sorte que la quantité d'éléments nutritifs ainsi perdus peut être supérieure à la quantité prélevée par la culture.

Tableau 7-10. Enlèvement des éléments nutritifs pour les grandes cultures en Ontario**LÉGENDE :** — = données non disponibles

Culture	Unité	N*	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S
Grains et oléagineux — canne ou paille (en fonction du poids sec) **							
canne de maïs	kg/t	8,0-10,6	2,1-6,4	17,4-20,0	3,5-13,4	2,5-8,6	1,3-1,7
	lb/t imp.	16,0-21,2	4,1-12,8	34,8-39,9	7,0-11,4	5,0-17,2	2,6-3,4
canne de soya	kg/t	8,0-23,0	1,0-4,4	8,7-19,0	15,0-17,3	4,1-8,6	3,1-6,5
	lb/t imp.	4,0-46,0	2,0-8,8	17,4-37,9	30,0-34,6	8,1-17,2	6,2-13,0
paille de blé d'automne	kg/t	4,4-9,6	1,0-4,9	12,0-23,2	1,6-10,4	0,4-7,1	2,7
	lb/t imp.	8,8-19,2	2,0-9,8	24,0-46,4	3,2-20,8	0,7	5,4
paille d'avoine	kg/t	6,0	3,2	19,0	2,4	0,7	2,3
	lb/t imp.	12,0	6,4	37,9	4,8	1,3	4,5
paille de seigle d'hiver	kg/t	6	6,1-8,2	6,3	—	0,3	1,0
	lb/t imp.	12,0	12,2-16,4	12,5	—	0,6	2,0
Fourrages (en fonction du poids sec)							
ensilage de maïs	kg/t	10,8-15,0	4,6-6,8	8,3-15,2	1,6-3,1	1,1-1,9	0,8-1,0
	lb/t imp.	21,6-29,9	9,3-13,6	16,6-30,4	3,3-6,1	2,3-3,8	1,6-2,0
légumineuses d'ensilage mi-fané	kg/t	26,6-36,8	5,3-7,9	22,4-35,5	11,3-17,7	1,9-3,6	1,9-2,0
	lb/t imp.	53,2-73,4	10,6-15,8	44,8-70,8	22,6-35,4	3,8-7,2	3,8-4,0
mélanges destinés à l'ensilage mi-fané	kg/t	22,8-33,9	5,2-7,8	22,4-35,6	9,5-16,4	1,6-3,4	1,5-2,9
	lb/t imp.	45,6-67,6	10,4-15,6	44,8-71,0	19,0-32,8	3,2-6,8	3,0-5,8
ensilage mi-fané de graminées	kg/t	16,2-27,4	4,9-7,8	20,4-35,9	5,3-11,3	1,3-2,6	0,8
	lb/t imp.	32,3-54,8	9,8-15,5	40,8-71,8	10,5-22,5	2,5-5,3	1,6
foin de légumineuses, 1 ^{re} coupe	kg/t	22,3-33,1	5,2-8,0	20,6-35,1	10,1-15,4	2,1-3,4	1,9-2,7
	lb/t imp.	44,6-66,2	10,4-16,0	41,2-70,0	20,2-30,8	4,2-6,8	3,8-5,4
foin mélangé, 1 ^{re} coupe	kg/t	17,2-27,4	5,0-7,2	17,0-29,8	8,2-13,5	1,8-3,0	1,3-2,1
	lb/t imp.	34,4-54,6	10,0-14,4	34,0-59,4	16,4-27,0	3,6-6,0	2,6-4,2
graminées, 1 ^{re} coupe	kg/t	12,9-22,7	4,4-7,0	13,9-28,1	5,3-10,6	1,4-2,6	1,4-2,0
	lb/t imp.	25,8-45,3	8,8-14,0	27,8-56,0	10,5-21,3	2,8-5,3	2,8-4,0
foin mélangé, 2 ^e coupe	kg/t	25,4-35,9	5,7-7,8	19,7-31,9	11,4-17,0	2,3-3,8	1,8-2,8
	lb/t imp.	50,7-71,7	11,3-15,7	39,7-63,7	22,7-34,0	4,7-7,7	3,7-5,7

* Le soya, les haricots secs et les légumineuses fourragères tirent la plus grande partie de leur azote de l'air.

** Les teneurs en éléments nutritifs dans la canne ou la paille récoltées sont extrêmement variables en raison de variations dans les méthodes de récolte (hauteur de coupe, méthode de collecte, moment de la récolte, etc.). Il est recommandé de procéder à des analyses des éléments nutritifs sur un sous-échantillon représentant la matière récoltée pour obtenir des estimations plus fiables de l'enlèvement des éléments nutritifs.

Fourchettes de prélèvement et d'enlèvement d'éléments nutritifs correspondant aux niveaux de rendement types de grandes cultures bénéficiant de bonnes conditions de croissance. Les valeurs reposent dans la mesure du possible sur des données recueillies sur le terrain en Ontario ainsi que sur des estimations. Les quantités d'éléments nutritifs prélevés et enlevés varient en fonction du rendement de la culture, alors que les concentrations d'éléments nutritifs varieront aussi en fonction de l'année, du niveau de fertilité du sol et de la variété de culture. Pour être précise, la planification de la gestion des éléments nutritifs exige une analyse annuelle de chaque culture. Les changements réels de fertilité du sol ne correspondent pas nécessairement aux quantités prélevées par la culture. Dans certains cas, la météorisation des matériaux du sol et de la matière organique peut compenser en partie la quantité d'éléments nutritifs prélevés par les cultures. Dans d'autres, les éléments nutritifs peuvent se lier chimiquement au sol ou être perdus par lessivage, de sorte que la quantité d'éléments nutritifs ainsi perdus peut être supérieure à la quantité prélevée par la culture.

Tableau 7-11. Prélèvement des éléments nutritifs par les cultures horticoles et enlèvement des éléments nutritifs à leur récolte en Ontario

Fourchettes de prélèvement et d'enlèvement d'éléments nutritifs correspondant aux niveaux de rendement types des cultures horticoles bénéficiant de bonnes conditions de croissance

LÉGENDE : — = données non disponibles

Culture	prélèvement/ enlèvement	N*	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S
		kg/tonne (lb/t imp.)					
haricots verts	prélèvement	17 (34)	5-12 (10-24)	10-20,4 (20-40,7)	— —	2,2 (4,3)	— —
	enlèvement	2,9 (5,7)	0,5 (1)	5,7 (11,3)	— —	— —	— —
brocoli	prélèvement	16,6 (33,3)	1 (2)	20,6 (41,2)	— —	— —	— —
	enlèvement	6 (12)	0,6 (1,3)	4,5 (9)	— —	— —	— —
choux	prélèvement	3-4,8 (6-9,6)	0,8-1,8 (1,6-3,6)	3,3-5,4 (6,5-10,8)	1,1-3,3 (2,2-6,6)	1,1 (2,2)	0,9-1,1 (1,8-2,2)
	enlèvement	2,0-3,3 (4,0-6,6)	0,6-1,1 (1,2-2,2)	2,1-3,4 (4,2-6,8)	1,0-3,1 (2,0-6,2)	0,7 (1,4)	0,6-0,7 (1,2-1,4)
carotte	prélèvement	2,9 (5,8)	0,5 (1,0)	6,9 (13,8)	— —	— —	— —
	enlèvement	1,6 (3,2)	0,4 (0,8)	4,0 (8,0)	— —	— —	— —
maïs sucré	prélèvement	12,9-15,6 (25,8-31,2)	1,7-5,3 (3,3-10,5)	8,8-15,1 (17,5-30,2)	— —	2,3 (4,5)	1,3 (2,5)
	enlèvement	4,2 (8,3)	0,3 (0,7)	2,5 (5,0)	— —	— —	— —
oignon	prélèvement	3-3,6 (6-7,3)	0,6-1,3 (1,3-2,7)	2,6-3,9 (5,3-7,8)	0,8 (1,5)	0,3 (0,5)	0,5-0,9 (1,0-1,8)
	enlèvement	1,9 (3,8)	0,4 (0,8)	2,0-2,1 (4,0-4,3)	0,6 (1,2)	0,1-0,3 (0,2-0,5)	0,5-0,9 (1,0-1,8)
petits pois	prélèvement	43-65 (85-130)	5,5-14,0 (11-28)	20-42 (40-84)	— —	7,3 (14,5)	4 (8)
	enlèvement	10 (20)	0,5 (1)	7,5 (15)	— —	— —	— —
pomme de terre	prélèvement	5,3-5,7 (10,7-11,3)	1,7-1,8 (3,3-3,7)	7,3-11,0 (14,7-22,0)	— —	1 (2)	0,5 (1)
	enlèvement	2,1 (4,2)	0,4 (0,8)	3,6-4,2 (7,2-8,3)	0,08 (0,16)	0,17 (0,33)	0,17-0,20 (0,33-0,40)
betterave à sucre	prélèvement	4,2-4,8 (8,5-9,6)	0,7-1,5 (1,3-3,0)	8,8-9,2 (17,5-18,3)	— —	1,3 (2,7)	0,7-0,8 (1,4-1,6)
	enlèvement	2,0-2,1 (4,0-4,2)	0,3-0,9 (0,5-1,8)	3,3-4,2 (6,5-8,3)	— —	— —	0,3 (0,6)
tabac	prélèvement	42-55 (84-110)	8,5-15 (17-30)	85,0-85,5 (170-171)	— —	9 (18)	7 (14)
	enlèvement	28,0-37,5 (56-75)	2-3 (4-6)	52-60 (104-120)	37,5 (75)	8 (16)	6,5 (13)

* Les légumineuses comme les haricots et les pois tirent la plus grande partie de leur azote de l'atmosphère.

Tableau 7-11. Prélèvement des éléments nutritifs par les cultures horticoles et enlèvement des éléments nutritifs à leur récolte en Ontario

Fourchettes de prélèvement et d'enlèvement d'éléments nutritifs correspondant aux niveaux de rendement types des cultures horticoles bénéficiant de bonnes conditions de croissance

LÉGENDE : — = données non disponibles

Culture	prélèvement/ enlèvement	N*	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S
		kg/tonne (lb/t imp.)					
tomate	prélèvement	2,9 (5,8)	1,1 (2,2)	5,8 (11,6)	— —	0,45 (0,9)	0,7 (1,4)
	enlèvement	1,8-2,0 (3,6-4,0)	0,3 (0,6)	3,5-3,6 (7,0-7,2)	0,18-0,30 (0,35-0,60)	0,28-0,30 (0,55-0,60)	0,35 (0,7)
pomme	prélèvement	4,2 (8,3)	1,9 (3,8)	7,5 (15)	— —	1 (2)	— —
raisin	prélèvement	4,3 (8,5)	1,5 (3)	6,7 (13,3)	— —	0,8 (1,5)	— —
pêches	prélèvement	1,7 (3,3)	0,7 (1,3)	2 (4)	0,36 (0,7)	— —	— —

* Les légumineuses comme les haricots et les pois tirent la plus grande partie de leur azote de l'atmosphère.

Recommandations de fertilisation fondées sur l'analyse des tissus végétaux

L'analyse des tissus, des feuilles ou des plants peut servir :

- à préciser les besoins en éléments nutritifs de cultures vivaces établies, par exemple framboises et mûres, arbres fruitiers et vignes;
- à confirmer un diagnostic établi à partir de l'observation de symptômes de croissance inhabituelle afin de corriger la situation sans tarder.

Dans les cultures vivaces, il est souvent préférable d'utiliser l'analyse des tissus parallèlement à l'analyse du sol. L'analyse des tissus aide aussi à montrer les éléments nutritifs qui sont prélevés par la culture par comparaison à ceux qui sont biodisponibles dans le sol. Une analyse de sol occasionnelle reste utile dans les vergers et les vignobles lorsqu'elle est accompagnée d'une analyse des tissus végétaux, notamment pour le contrôle du pH. Malgré cet avantage, il n'est pas facile d'établir une recommandation de

fertilisation sur la foi d'une analyse des tissus végétaux. Les analyses de tissus peuvent donc être utilisées pour rajuster l'épandage d'engrais pour la prochaine saison de croissance.

Conjugée à une analyse de sol, l'analyse des tissus végétaux permet de déceler les éléments nutritifs à surveiller ou faisant l'objet de carences. Une analyse des tissus peut déceler les éléments nutritifs qui sont en quantité limitée ou qui font l'objet d'une carence, mais ne fournit cependant pas de renseignements à temps pour apporter des corrections aux cultures annuelles dans la saison de culture courante.

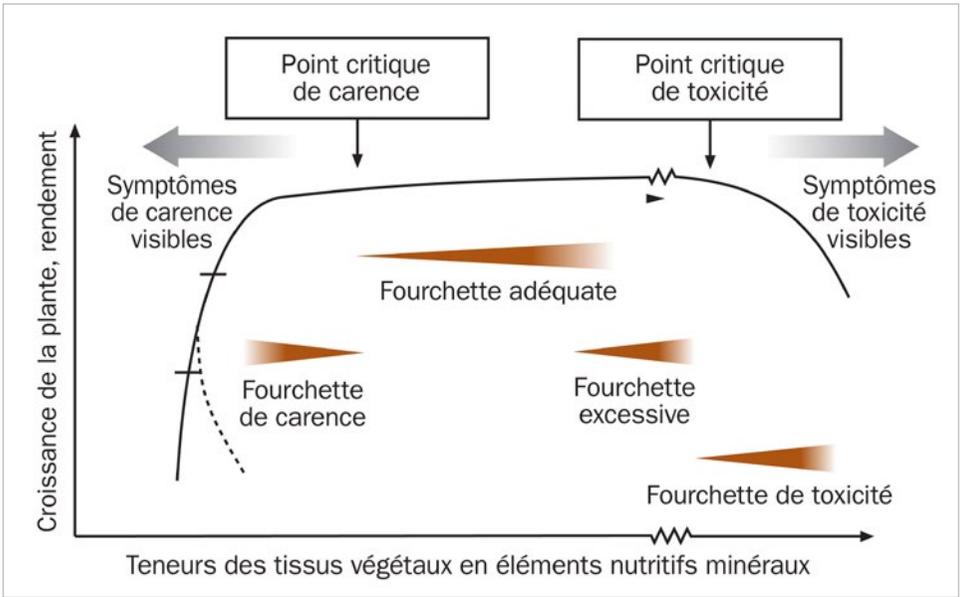


Figure 7–11. Rapport entre la teneur en éléments nutritifs des tissus végétaux et la croissance des plantes

Concentrations déficientes, critiques et suffisantes

L'analyse des tissus végétaux présente un élément nutritif comme faisant l'objet d'une carence lorsque sa concentration est inférieure à un seuil critique pour une partie donnée d'un végétal d'une culture donnée à un stade précis de son développement. La figure 7–11 illustre le concept de seuil critique séparant la fourchette des carences et celles des concentrations adéquates.

Afin d'interpréter l'analyse des tissus, le moment ou l'étape de la croissance de la plante et la partie de la plante qui est échantillonnée sont très importants. Pour de plus amples détails sur l'échantillonnage des tissus végétaux, consultez le chapitre 4.

Les guides de recommandations et de production culturales du MAAARO énumèrent un éventail d'éléments nutritifs critiques pour la plupart des cultures cultivées en Ontario. Nombre de publications sur les grandes cultures et les cultures horticoles précisent aussi

des valeurs critiques. La plupart des laboratoires qui font des analyses de tissus végétaux disposent de leur propre jeu de valeurs critiques, élaborées au fil de leur propre expérience. Il est important de suivre attentivement les instructions du laboratoire concernant la partie de la plante échantillonnée, le stade de son développement et la manipulation de l'échantillon.

Quand il s'agit de comprendre des singularités de la croissance d'un végétal, si le moment de l'échantillonnage ne correspond pas au stade de développement de la plante pour lequel existent des valeurs critiques, échantillonnez séparément des zones atteintes et non atteintes aux fins de comparaison.

Le tableau 7–12 présente les causes probables de concentrations excessives ou insuffisantes d'éléments nutritifs dans les échantillons de tissus végétaux. L'interprétation de ces résultats ne consiste pas seulement à examiner les chiffres apparaissant dans le rapport d'analyse.

Tableau 7-12. Causes pouvant expliquer la surabondance ou l'insuffisance d'éléments nutritifs dans les tissus végétaux

Élément nutritif	Excessive	Insuffisance
tous	la contamination de la matière végétale par le sol ou par la poussière peut hausser les valeurs de plusieurs éléments nutritifs; de la même façon, l'application foliaire récente d'engrais haussera les valeurs des analyses des tissus végétaux	un apport inadéquat de tout élément nutritif dans le sol tendra à produire de faibles résultats d'analyse des tissus végétaux
azote	épandage excessif d'azote de sources commerciales ou de fumier; concentrations élevées de matière organique dans le sol; taux élevés de minéralisation	peu de matière organique, compactage du sol, sécheresse du sol, sol gorgé d'eau entraînant une dénitrification
phosphore	résultat d'analyse du sol élevé, teneur en zinc faible ou frôlant la carence, épandage de fortes doses de P	faible pH ou pH élevé du sol, compactage du sol, sécheresse, sol froid, maladie des racines
potassium	épandage de fortes doses, fortes concentrations dans le sol	apport excessif d'azote, compactage du sol, sol froid
magnésium	maturité de parties de la plante, épandage excessif d'engrais à base de magnésium	faible pH, forte biodisponibilité du potassium, fortes concentrations d'azote ammoniacal
calcium	maturité de parties de la plante, feuilles malades, contamination de l'échantillon par le sol Remarque : les concentrations élevées de calcium sont rares.	sol sableux soumis au lessivage, fortes concentrations de potassium dans des sols à faible CEC, forte biodisponibilité de l'azote ammoniacal, faible pH, doses de chaux inadéquates
zinc	sol à teneur en zinc naturellement élevée, épandage excessif de fumiers de porc, sol riche en matière organique	pH du sol élevé, doses élevées d'épandage de phosphore, zones de sol érodé, sol pauvre en matière organique
manganèse	apports importants d'azote et de phosphore, pH faible, compactage du sol, sol peu oxygéné, contamination par des brouillards et de la poussière de pulvérisation	pH du sol élevé, sol très aéré, sol riche en matière organique
cuivre	sol riche en cuivre, pulvérisation de produits fongicides, éclaboussures de sol sur les feuilles	sol riche en matière organique, sol soumis au lessivage, sol riche en zinc et en manganèse
fer	sol détrempé, présence de sol sur les feuilles, carence en zinc	excès de phosphore, de zinc, de cuivre et de manganèse
bore	application de mauvaises doses, pH du sol faible	sols sableux soumis au lessivage, sol pauvre en matière organique, sols sableux secs
soufre	épandage de fortes doses de soufre sulfate, résidus de pulvérisation foliaire sur les feuilles	application de doses excessives d'azote ou minéralisation rapide attribuable à la matière organique contenue dans le sol, pertes par lessivage
molybdène	pH du sol élevé, résidus d'applications foliaires	pH du sol faible, forte concentration de phosphore, apports de soufre (antagonisme des ions au niveau des racines)

Système intégré de diagnostic et de recommandation (DRIS)

Au départ, le système DRIS a été conçu pour s'appliquer à la fois aux analyses de sols et aux analyses de tissus végétaux. En Amérique du Nord, on l'utilise plus souvent pour les analyses de tissus.

Le système rattache des jeux complets de concentrations et de ratios d'éléments nutritifs d'une culture donnée à ceux des mêmes cultures pratiquées dans des conditions optimales à des niveaux de rendement atteignables maximaux. Les valeurs et ratios obtenus de ces cultures constituent les normes du DRIS.

Lorsque le système DRIS est appliqué à l'analyse des tissus végétaux, les éléments nutritifs essentiels sont classés les uns par rapport aux autres selon un ordre de carence décroissante. Dans certains cas, cette analyse a été jugée plus sensible que le point critique ou que la dose suffisante dans la détermination de la pertinence d'une dose accrue d'un ou de plusieurs éléments nutritifs. Comme le système DRIS fait appel à des ratios d'éléments nutritifs, la dilution de la matière sèche en raison de la maturation de la culture est réduite au minimum et le moment de l'échantillonnage a moins d'influence sur les résultats d'analyse.

Au départ, on croyait que les normes DRIS pouvaient s'appliquer à de grandes régions. Toutefois, d'après des études menées sur les principales cultures agronomiques, les normes locales ou régionales sont plus précises pour diagnostiquer les carences. Même si les normes DRIS ne sont pas encore devenues un système totalement fiable pour les recommandations d'épandage, elles offrent la possibilité de réunir tous les éléments de la nutrition des végétaux et de les évaluer simultanément avec le rendement dans le cadre du processus. Si l'on finit par disposer de données propices

à une pondération adéquate, le système DRIS pourrait éventuellement être davantage utilisé.

Des recommandations de fertilisation et non des normes

Aucune table de recommandations ne peut couvrir toutes les situations. Une recommandation n'est pas une norme. Une recommandation, quelle qu'en soit la source, peut toujours être corrigée en fonction de l'expérience locale, de la connaissance des sols de la région et de la situation financière du producteur. Il est plus avisé d'apporter des ajustements de ce genre que de recourir aux recommandations générales.

Le fournisseur d'engrais chimiques est souvent bien placé pour connaître les particularités des sols, en raison des limites géographiques de distribution d'une usine de préparation des engrais. Pour cette raison, chaque point de vente au détail devrait avoir au moins un agronome ou un conseiller en culture agréé compétent, capable de formuler des recommandations pertinentes.

Références

- Alvarez, R. et H.S. Steinbach. 2017. « Modelin soil test phosphorus changes under fertilized and unfertilized managements using artificial neural networks » dans *Agronomy Journal* 109:1–13, doi:10,2134/agronj2017.01.0014.
- Bear, F.E., A.L. Prince et J.L. Malcom. 1945. « Potassium needs on New Jersey soils » dans *New Jersey Agric. Exp. Sta. Bul.* 721.
- Black, Charles A. 1993. *Soil Fertility Evaluation and Control*. Boca Raton, Florida : Lewis Publishers.

- Foth, H.D. et B.G. Ellis. 1996. *Soil Fertility*. 2^e éd. CRC Press, Inc.
- Janovicek, K., B. Rosser et G. Stewart. 2015. *An Ontario P&K database to affirm and update BMP's in field crop production systems*. Rapport au Comité ontarien de la recherche et des services en matière de gestion des sols. 25 pp.
- Kablan, L.A., V. Chabot, A. Mailloux, M.E. Bouchard, D. Fontaine et T. Bruulsema. 2017. « Variability in corn yield response to nitrogen fertilizer in eastern Canada » dans *Agronomy Journal* 109:1–12.
- Kachanoski, R.G. et G.L. Fairchild. 1994. « Field scale fertilizer recommendations and spatial variability of soil test values » dans *Better Crops* 78(4):20–23.
- Kachanoski, R.G., I.P. O'Halloran, D. Aspinall et P. von Bertoldi. 1996. « Delta yield: Mapping fertilizer nitrogen requirements for crops » dans *Better Crops* 80:20–23.
- Lory, J.A. et P.C. Scharf. 2003. « Yield goal versus delta yield for predicting fertilizer nitrogen need in corn » dans *Agron. J.* 95:994–999.
- Marschner, Horst, 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. San Diego, Californie. Academic Press Inc.
- Mueller, S.M. et T.J. Vyn. 2016. « Maize plant resilience to N stress and post-silking N capacity changes over time: a review », dans *Frontiers in Plant Science*. 7:53.
- Murdock, L. 1997. « Evaluating fertilizer recommendations. » *AGR-151 Cooperative Extension Service*, Université du Kentucky, 5 pp.
- Olsen, R.A., K.D. Frank, P.H. Grabouski et G.W. Rehm. 1982. « Economic and agronomic impacts of varied philosophies of soil testing », dans *Agronomy Journal* 74:492–499.
- Reid, W.S. 1996. « Influence of lime and calcium:magnesium ratio on alfalfa and birdsfoot trefoil yields » dans *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 27: 1885–1900.
- Reetz, H.F. Jr. et P.E. Fixen. 1992. « Economics of long-term and short-term soil fertility management » dans *Better Crops* 76(2):8–11.
- Richards, J.E., T.E. Bates et S.C. Sheppard. 1995. « Changes in the form and distribution of soil phosphorus due to long-term corn production » dans *Can. J. Soil Sci.* 75:311–318.
- Stevenson, C.K. 1983. « Maximum yield research progress at Ridgetown College in Ontario » dans *Better Crops* 68(1):4–5.
- Stevenson, C.K. et M.C. MacAlpine. 1996. *Penicillium bilaii phosphorus research with corn*. Rapport N° 51, Collège de technologie agricole de Ridgetown.
- Tremblay, N., Y.M. Bouroubi, C. Bélec, R.W. Mullen, N.R. Kitchen, W.E. Thomason, S. Ebelhar, D.B. Mengel, W.R. Raun, D.D. Francis, E.D. Vories et I. Ortiz-Monasterio. 2012. « Corn response to nitrogen influenced by soil texture and weather » dans *Agronomy Journal* 104(6):1658–1671.
- Xie, M., N. Tremblay, G. Tremblay, G. Bourgeois, Y.M. Bouroubi et Z. Wei. 2013. « Weather effects on corn response to in-season nitrogen rates » dans *Canadian Journal Plant Science* 93:407–417.

8. Ingrédients, mélanges et application des engrais

Engrais

Quel que soit l'engrais, la nature de ses constituants, la façon dont ceux-ci sont mélangés et la méthode d'application utilisée auront une grande influence sur le programme de fertilisation. La plupart des engrais utilisés en Ontario se présentent sous forme de granules, mais ils viennent aussi sous forme gazeuse ou liquide. Tous ces produits sont décrits ci-dessous et énumérés dans le tableau 8-1, qui précise de plus leur formulation (% de N-P₂O₅-K₂O en poids) ainsi que leurs caractéristiques chimiques, de manutention et d'utilisation. Tous les engrais doivent être manutentionnés de façon sécuritaire et efficace. Les fiches techniques santé-sécurité (FTSS) décrivent les caractéristiques de chaque matière et sont disponibles à chaque point de vente, pour les consommateurs et les employés.

Les engrais en granules sont en général plus concentrés (teneur en éléments nutritifs) que les engrais liquides et sont relativement moins coûteux. Les obligations en matière d'entreposage, de manutention et de transport qui s'appliquent à ces engrais diffèrent de celles qui s'appliquent aux engrais liquides ou gazeux. Les granulés peuvent être mélangés entre eux de façon à obtenir une formulation composée adaptée aux besoins des cultures.

Règle générale, les engrais liquides ont un coût de revient plus élevé par unité d'élément nutritif que les granules en raison du poids et du volume supplémentaires qu'il faut transporter et, dans certains cas, de la transformation

supplémentaire nécessaire. En contrepartie, il est possible de les pomper et ils sont faciles à mesurer et à mettre en place avec précision.

En 2016, le polyphosphate d'ammonium (10-34-0), un liquide, coûtait 84 % plus cher que la même quantité d'éléments nutritifs achetés comme monophosphate d'ammonium (granules). L'écart est encore plus grand dans le cas des engrais complets N-P-K, où les liquides peuvent coûter deux fois plus cher que leur équivalent en granules.

Sources d'azote (N)

Urée (46-0-0)

- CO(NH₂)₂
- Blanc
- Fabriqué à partir d'ammoniac et de dioxyde de carbone
- Source d'engrais azoté la plus couramment utilisée dans le monde entier
- Peut contenir de petites quantités (de 0,5 à 1,5 %) de biuret, environ 0,3 % d'un agent de conditionnement (formaldéhyde ou méthylène diuréé) et moins de 0,5 % d'eau
- Les formulations destinées aux applications foliaires devraient renfermer moins de biuret
- L'urée se convertit en azote ammoniacal dans le sol. L'uréase, une enzyme présente dans le sol, les bactéries et les résidus de culture, accélère le processus. L'urée épandue en surface est sujette à des pertes de gaz ammoniac. Les pertes augmentent avec le pH du sol, la superficie de couvert de résidus et l'élévation des températures

Nitrate d'ammonium (34-0-0)

- NH_4NO_3
- Produit en combinant de l'ammoniac et de l'acide nitrique
- Peut contenir environ 1 % d'un agent de conditionnement et 0,5 % d'eau
- Coûte plus cher par unité d'azote que l'urée
- N'est plus produit au Canada
- Des règlements s'appliquent à son transport (classe 5.1 en vertu du Règlement sur le transport des marchandises dangereuses)
- À conserver loin des huiles et autres matières inflammables, car il peut former un mélange explosif
- Plus hygroscopique que l'urée, il peut se détériorer durant l'entreposage durant du temps très chaud, à mesure que les changements dans la phase cristalline entraînent la dégradation des sphérules

Lorsqu'il est appliqué sur le sol, le nitrate d'ammonium se dissout dans l'eau du sol et libère de l'ammonium et du nitrate, l'un et l'autre pouvant être absorbés par les végétaux. Il est assimilable plus rapidement que l'urée à basses températures, mais dans les conditions de culturales normales, il n'y a pratiquement pas de différence.

Nitrate d'ammonium et de calcium (27-0-0)

- Mélange uniforme renfermant 80 % de nitrate d'ammonium et soit de la chaux calcitique, soit de la chaux dolomitique
- La chaux réduit les risques d'explosion

Lorsqu'il est épandu à des poids égaux que l'azote, le nitrate d'ammonium et de calcium est semblable au nitrate d'ammonium. La chaux incluse dans les granules compense une partie de l'acidité libérée par l'azote, ce qui fait qu'elle n'acidifie par le sol aussi rapidement que le nitrate d'ammonium.

Solution de nitrate d'ammonium et d'urée (NAU) (de 28-0-0 à 32-0-0)

- Produit de la dissolution de l'urée et du nitrate d'ammonium (50:50) dans l'eau
- La formulation 28-0-0 peut former un précipité si la température baisse sous les $-18\text{ }^\circ\text{C}$ ($0\text{ }^\circ\text{F}$)
- Il existe une solution plus concentrée (32-0-0), mais elle est rarement utilisée en Ontario, car un précipité se forme dès que la température atteint $0\text{ }^\circ\text{C}$
- En raison de sa teneur en urée, cette solution est sujette à des pertes comme l'ammoniac si elle est épandue sur la surface du sol
- On y ajoute souvent des herbicides et autres pesticides pour les épandages en pleine surface
- Ne doit pas entrer en contact avec le feuillage, sous peine de le brûler gravement
- Se prête aux épandages en bandes latérales

La NAU est l'engrais liquide offert sur le marché qui est le plus couramment utilisé en Ontario.

Ammoniac anhydre (82-0-0)

- NH_3
- Fabriqué en faisant réagir du gaz naturel avec l'azote atmosphérique sous des températures et des pressions élevées
- Gaz incolore dégageant une odeur âcre à la pression atmosphérique
- Se manipule comme un liquide sous pression; à $-2\text{ }^\circ\text{C}$ ($28\text{ }^\circ\text{F}$), la pression est la même que celle de l'air ambiant; à $16\text{ }^\circ\text{C}$ ($60\text{ }^\circ\text{F}$), elle est de 655 kPa (95 lb/po^2)
- Constituant de tous les engrais azotés offerts sur le marché
- Son effet acidifiant est semblable à l'urée et au nitrate d'ammonium ($1,8\text{ lb CaCO}_3$ pour neutraliser l'acidité produite par lb d'azote fourni)

L'ammoniac anhydre est appliqué directement par injection dans le sol où il se vaporise et se dissout dans l'eau du sol. Pour éviter les pertes par vaporisation dans l'air, la bande d'ammoniac anhydre doit être placée à une profondeur suffisante dans le sol afin qu'elle puisse être complètement emprisonnée dans la fente d'injection.

On se questionne sur la nuisibilité de l'ammoniac anhydre pour la vie du sol. Dans la bande d'injection, le pH élevé du sol et les conditions hygroscopiques suffisent à tuer les vers de terre et autres représentants de la faune et de la microflore du sol, mais cette zone est relativement petite et le produit se dissipe rapidement. Les populations d'organismes terricoles se rétablissent rapidement et augmentent même par suite de l'ajout d'azote dans l'écosystème du sol.

Sulfate d'ammonium (21-0-0)

- $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
- Sous-produit industriel cristallin blanc marron obtenu en neutralisant l'ammoniac produit par les fours à coke avec de l'acide sulfurique recyclé, ou par la fabrication de nylon
- Peut contenir environ 0,5 % d'eau et d'infimes quantités d'éléments nutritifs tels que potassium, calcium, cuivre, fer, manganèse et zinc
- Revient en général plus cher par unité de N que l'urée

Le sulfate d'ammonium se décompose en ammonium et en sulfate lorsqu'il est dissous dans l'eau du sol. Il est utile aux épandages en pleine surface, car il comporte moins de risques de volatilisation de l'ammoniac. Selon la source, il est sous forme de granules ou d'une poudre grossière.

Nitrate de calcium (15-0-0)

- $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$
- Source d'azote coûteuse
- Utilisé uniquement quand des apports de calcium et d'azote sont nécessaires et qu'il faut éviter l'acidification du sol
- Renferme de l'azote sous forme de nitrate et du calcium hydrosolubles
- Très hygroscopique; peut se liquéfier complètement lorsqu'exposé à l'air avec une humidité relative supérieure à 47 %; les sacs ouverts doivent être entreposés dans un sac étanche étroitement fermé

Hautement solubles, le calcium et l'azote des nitrates sont immédiatement assimilables par les plantes.

Nitrate de potassium (12-0-44)

- KNO_3
- Extrait de lacs salés asséchés (p. ex. la mer morte) ou fabriqué par réaction du chlorure de potassium avec de l'acide nitrique
- Source coûteuse de N et de K
- Surtout utilisé dans les cultures horticoles, du tabac ou hydroponiques

Mais qu'est-ce que c'est que ces petits nuages de vapeur?

Vous êtes-vous déjà questionné sur les petits nuages de vapeur qui apparaissent derrière l'épandeur d'ammoniac anhydre?

À la vue de ces petits nuages, bien des producteurs craignent d'être en train de perdre de grandes quantités d'engrais azoté. En fait, ce qu'ils voient est un brouillard créé par le gaz ammoniac froid qui condense la vapeur d'eau. On estime que chaque millilitre d'ammoniac peut produire plus d'un litre de brouillard. En moyenne, les pertes attribuables à ce changement de phase ne sont que de 4 % et sont moins grandes encore sous de bonnes conditions.

Tableau 8-1. Ingrédients courants des engrais

LÉGENDE : – = aucun n/d = non disponible							
Ingrédient	Formule ¹ (%)	Autres éléments nutritifs ²	Indice de salinité ³	Équivalent ⁴ de CaCO ₃ (lb/lb)	Densité apparente ⁵ (lb/pi ³)	Densité apparente ⁵ (kg/L)	Coût relatif/unité d'élément nutritif ⁶
Granules							
urée	46-0-0	–	74	1,8	50	0,80	1,00
nitrate d'ammonium	34-0-0	–	104	1,8	56	0,90	1,42
nitrate d'ammonium et de calcium	27-0-0	4-6 % Ca 0-2 % Mg	93	0,9	68	1,10	1,46
sulfate d'ammonium	21-0-0	24 % S	88	3,6	68	1,10	1,41-2,04
nitrate de calcium	15-0-0	19 % Ca	65	-1,3 (B)	75	1,20	3,72
nitrate de potassium	12-0-44	–	70	-1,9 (B)	75	1,20	2,54
nitrate de sodium	16-0-0	–	100	-1,8 (B)	78	1,25	n/d
superphosphate simple	0-20-0	20 % Ca, 12 % S	8	neutre	68	1,10	1,77
superphosphate triple	0-46-0	21 % Ca	10	neutre	68	1,10	1,00
monophosphate d'ammonium	11-52-0	–	27	5,4	62	1,00	0,82
diphosphate d'ammonium	18-46-0	–	29	3,6	62	1,00	0,81
chlorure de potassium (rouge)	0-0-60	45 % Cl	115	neutre	70	1,10	1,00
chlorure de potassium (blanc)	0-0-62	46 % Cl	116	neutre	75	1,20	1,00
sulfate de potassium	0-0-50	18 % S	43	neutre	75	1,20	2,34
sulfate de potassium- magnésium	0-0-22	20 % S 11 % Mg	43	neutre	94	1,50	3,71

¹ Formule : concentration minimale garantie en poids d'azote total, d'acide phosphorique biodisponible (P₂O₅) et de potasse soluble (K₂O) dans chaque engrais.

² Éléments nutritifs autres que N, P ou K.

³ Indice de salinité : comparaison des solubilités relatives des composés de fertilisation avec le nitrate de sodium (100) en poids de matière. Si elles sont appliquées trop près de la semence ou du feuillage, les matières qui possèdent un indice de salinité élevé risquent davantage de causer des dommages.

⁴ Équivalent de CaCO₃ : livres de chaux nécessaires pour neutraliser l'acide formé par une livre d'azote fournie par l'engrais. La lettre « B » suivant l'indice de chaulage indique un ingrédient alcalin ou basique (neutralisateur d'acide). **Remarque** : Les effets acidifiants peuvent être jusqu'à deux fois plus élevés que ce qui est indiqué, selon les prélèvements qui sont faits par les végétaux.

⁵ Densité apparente : exprimée comme livres par pied cube ou kg/L. Cela est important puisque les engrais sont mesurés par volume plutôt que par poids par les épandeurs ou les semoirs.

⁶ Coût relatif/unité : d'après les prix de 2006 de l'urée pour le N, du superphosphate triple pour le P, et du chlorure de potassium pour le K.

Tableau 8-1. Ingrédients courants des engrais**LÉGENDE :** – = aucun

n/d = non disponible

Ingrédient	Formule ¹ (%)	Autres éléments nutritifs ²	Indice de salinité ³	Équivalent ⁴ de CaCO ₃ (lb/lb)	Densité apparente ⁵ (lb/pi ³)	Densité apparente ⁵ (kg/L)	Coût relatif/unité d'élément nutritif ⁶
Liquide							
ammoniac anhydre	82-0-0	–	47	1,8	37	0,6	0,83
solution de nitrate d'ammonium et d'urée (NAU)	28-0-0	–	63	1,8	80	1,28	1,10
	32-0-0	–	71	n/d	82	1,32	n/d
solution de polyphosphate d'ammonium	10-34-0 11-37-0	–	20	3,6	87	1,40	1,27

¹ Formule : concentration minimale garantie en poids d'azote total, d'acide phosphorique biodisponible (P₂O₅) et de potasse soluble (K₂O) dans chaque engrais.

² Éléments nutritifs autres que N, P ou K.

³ Indice de salinité : comparaison des solubilités relatives des composés de fertilisation avec le nitrate de sodium (100) en poids de matière. Si elles sont appliquées trop près de la semence ou du feuillage, les matières qui possèdent un indice de salinité élevé risquent davantage de causer des dommages.

⁴ Équivalent de CaCO₃ : livres de chaux nécessaires pour neutraliser l'acide formé par une livre d'azote fournie par l'engrais. La lettre « B » suivant l'indice de chaulage indique un ingrédient alcalin ou basique (neutralisateur d'acide). **Remarque :** Les effets acidifiants peuvent être jusqu'à deux fois plus élevés que ce qui est indiqué, selon les prélèvements qui sont faits par les végétaux.

⁵ Densité apparente : exprimée comme livres par pied cube ou kg/L. Cela est important puisque les engrais sont mesurés par volume plutôt que par poids par les épandeurs ou les semoirs.

⁶ Coût relatif/unité : d'après les prix de 2006 de l'urée pour le N, du superphosphate triple pour le P, et du chlorure de potassium pour le K.

Sources de phosphore (P)

Superphosphate simple (0-20-0)

- Constitué environ de deux parts égales de phosphate monocalcique et de gypse [Ca(H₂PO₄)₂•H₂O + CaSO₄•2H₂O]
- Issu de la réaction de roches phosphatées avec de l'acide sulfurique
- Contient habituellement 20 % de phosphate assimilable, 12 % de soufre et 20 % de calcium

Le plus ancien engrais commercial, le superphosphate simple, a été sur le marché depuis 1840 et n'est plus offert par les principaux fournisseurs d'engrais de l'Ontario. Il a été largement remplacé par le monophosphate d'ammonium (MPA).

Superphosphate triple (0-46-0)

- Constitué essentiellement de phosphate monocalcique [Ca(H₂PO₄)₂•H₂O]
- Issu de la réaction de roches phosphatées avec de l'acide phosphorique
- Renferme environ 83 % de phosphate monocalcique, 2 % d'eau, le reste étant surtout des roches phosphatées qui n'ont pas réagi et d'autres phosphates insolubles

Le phosphate monocalcique est un sel acide qui décompose l'urée assez facilement. Le superphosphate triple ne doit pas être mélangé avec de l'urée. Il est rarement offert en Ontario et un seul fabricant en produit en Amérique du Nord, dans l'Ouest américain.

Monophosphate d'ammonium (MPA; 11-52-0)

- $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$
- Issu de la réaction de l'ammoniac anhydre avec de l'acide phosphorique
- Couleur allant du blanc cassé au gris
- Renferme habituellement 85 % du composé chimique pur, de 3 à 5 % de diphosphate d'ammonium, 1 % d'eau, le reste étant constitué de magnésium, de sulfates et d'autres phosphates
- Source d'azote économique (de 10 % à 12,5 %) et de P (de 48 % à 52 % P_2O_5)

Le monophosphate d'ammonium est la source de P privilégiée en Ontario en raison de sa grande valeur fertilisante et de son innocuité relative pour les cultures lorsqu'il est utilisé dans les engrais de démarrage. Il convient bien aux épandages en bandes au départ des cultures.

Diphosphate d'ammonium (DPA; 18-46-0)

- $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$
- Issu de la réaction de l'ammoniac anhydre et de l'acide phosphorique
- Coût unitaire relativement faible
- Couleur allant du gris pâle au gris foncé
- Renferme habituellement 80 % du composé chimique pur, de 10 % de monophosphate d'ammonium, de 1 % à 2 % d'eau, le reste étant constitué de magnésium, de sulfates et d'autres phosphates
- Peut également contenir une petite quantité de nitrate d'ammonium ou d'urée ajoutée pendant la fabrication pour relever la teneur en azote jusqu'à la concentration garantie, soit 18 %
- Renferme de l'azote à 100 % hydrosoluble et du phosphate assimilable habituellement à 90 % hydrosoluble

Le diphosphate d'ammonium est la principale source de P depuis plusieurs décennies en raison de son faible coût et de sa forte valeur fertilisante. Il n'est toutefois pas toujours le choix le plus indiqué en raison des risques de dommages par l'ammoniac qu'il comporte pour les cultures lorsqu'il est utilisé comme engrais de démarrage, particulièrement dans les sols alcalins. La disponibilité du DPA est très limitée en Ontario et il a été remplacé par le monophosphate d'ammonium (MPA).

Polyphosphate d'ammonium

- $(\text{NH}_4)_3\text{HP}_2\text{O}_7$
- Solution liquide 10-34-0 (peut aussi être 11-37-0)
- Environ 75 % du P est du polyphosphate, 25 % étant de l'orthophosphate
- Issu de la réaction de l'ammoniac avec de l'acide pyrophosphorique, lequel est obtenu par déshydratation de l'acide phosphorique
- Possède un pH de 6, donc presque neutre
- Se mélange bien avec la NAU

La formule de 10-34-0 se mélange également bien avec des oligo-éléments. Par exemple, elle permet de maintenir une concentration de 2 % de Zn dans la solution comparativement à 0,05 % avec le (H_3PO_4).

Phosphate naturel

- Roche sédimentaire constituée essentiellement de fluorophosphate de calcium avec impuretés de fer, d'aluminium et de magnésium
- Matière première pour la fabrication des engrais phosphorés
- Parfois présenté comme étant une source « naturelle » de P
- Le P n'est pas hydrosoluble

- De 5% à 17 % du P qu'il contient est soluble dans le citrate
- Finement moulu, il peut fournir suffisamment de P assimilable par les végétaux dans les sols à faible pH (acides) lorsqu'il est épandu à des doses de 2 à 3 fois supérieures à celle des superphosphates
- Biodisponibilité de faible à nulle dans les sols neutres ou alcalins

Sources de potassium (K)

Chlorure de potassium (0-0-60 ou 0-0-62)

- KCl (chlorure de potassium)
- Source la plus courante et la moins coûteuse de K
- Contient du chlore (47 %), un élément nutritif essentiel pour les plantes, nécessaire à la division cellulaire, à la photosynthèse et à la suppression des maladies
- Souvent livré avec une petite quantité (moins de 100 grammes par tonne) d'un agent anti-agglomérant à base d'amines ou de pétrole
- Les formes rouges et blanches offrent une biodisponibilité égale du K aux végétaux

Chlorure de potassium rouge (0-0-60)

- Extrait principalement en Saskatchewan et dans une certaine mesure au Nouveau-Brunswick
- Renferme environ 97 % de chlorure de potassium (KCl)
- Couleur attribuable aux impuretés de fer; n'influence pas la solubilité

Chlorure de potassium blanc (0-0-62)

- Obtenu par cristallisation du chlorure de potassium issu de l'extraction de la potasse par dissolution
- Chlorure de potassium presque pur

Sulfate de potassium (0-0-50-17S)

- K_2SO_4
- Extrait des saumures du Grand Lac Salé en Utah
- Contient aussi 17 % de soufre sous forme hydrosoluble

Par rapport au chlorure de potassium, le sulfate de potassium, ou sulfate de potasse, possède un indice de salinité plus faible et coûte plus cher. Il est surtout utilisé sur des cultures sensibles au chlorure, comme le tabac, la pomme de terre, les arbres fruitiers et certains légumes.

Sulfate de potassium-magnésium (0-0-22-10,5Mg-22S)

- Sulfate de potassium-magnésium $K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$
- Extrait de gisements au Nouveau-Mexique
- Communément appelé K-Mag et Sul-Po-Mag.

Le sulfate de potassium-magnésium coûte plus cher l'unité de K que le chlorure de potassium. Il contient également 10,5 % de magnésium et 22 % de soufre dans une forme hydrosoluble et est donc immédiatement assimilable par les plantes. Il est utile comme source de magnésium soluble dans les champs où le chaulage n'est pas nécessaire.

Tableau 8–2. Mélanges d’engrais liquides

Analyses	Poids/gal US (lb)	Poids/gal imp. (lb)	Poids/litre (lb)	Gal imp./tonne	Gal US/tonne	Litre/tonne
8-25-3	11,11	13,35	2,94	165,1	198,4	749,9
6-18-6	10,69	12,85	2,83	171,6	206,2	779,0
3-11-11	10,45	12,55	2,76	175,7	211,0	798,8
9-9-9	10,49	12,60	2,77	175,0	210,2	795,9
7-7-7	10,41	12,5	2,75	176,4	211,8	801,7
6-24-6	11,07	13,30	2,93	165,8	199,2	752,4
9-18-9	11,07	13,30	2,92	165,8	199,2	755
5-10-15	10,7	12,85	2,83	171,6	206,0	799
2-10-15	10,62	12,75	2,81	172,9	207,6	784,6
10-34-0	11,6	14,0	3,09	157,0	188,5	715,8

1 gallon impérial = 1,201 gallon US

1 gallon US = 3,785 litres

1 gallon US = 0,8326 gallon impérial

1 gallon impérial = 4,546 litres

Solutions claires

- Disponibilité sur le marché d’un large éventail d’engrais à base de N-P et N-P-K à pH neutre (voir le tableau 7–2)
- Engrais à base de polyphosphate d’ammonium (10-34-0)
- Fabriquées par l’ajout au polyphosphate d’ammonium, d’urée, d’ammoniaque, d’acide phosphorique, de chlorure de potassium ou d’hydroxyde de potassium
- Possibilité d’y ajouter des oligo-éléments, pourvu qu’ils soient sous forme de chélates
- Tous les ingrédients doivent être de haute qualité, puisque les impuretés peuvent provoquer le relargage (précipitation en sel) ou la gélification de la solution
- Produit généralement de grande qualité agronomique, bien que les dommages causés par le sel aux semences et aux racines soient à craindre quand les doses de N et de K augmentent
- Utilisées le plus couramment comme engrais de démarrage dans la raie de semis
- Réduction de temps et de main-d’œuvre au moment des semis en raison des faibles doses et de la possibilité de pomper le produit de la citerne au semoir

- Possibilité de réduire les coûts au chapitre du matériel utilisé pour les semis du fait qu’il n’est pas nécessaire d’utiliser un organe ouvreuseur distinct pour l’engrais

Solutions acides

- Combinaisons d’acide phosphorique, d’acide sulfurique et d’urée
- Possibilité d’ajouter des oligo-éléments qui ne sont pas sous forme de chélates

Les solutions acides ne sont pas très répandues en Ontario parce qu’elles sont corrosives et coûteuses comparativement aux engrais granulaires. Ces solutions sont mises de l’avant en partant du principe que les éléments nutritifs sont plus assimilables aux pH faibles qu’on trouve dans la bande de fertilisation, particulièrement dans les sols alcalins. La plupart des sols sont toutefois suffisamment tamponnés pour que l’ajout d’acide n’ait aucun effet sur le pH du sol. Ces produits sont aussi bons, mais pas meilleurs, que les autres engrais sur le plan de la biodisponibilité des éléments nutritifs.

Suspensions

- Produites par le mélange d'ingrédients secs finement moulus avec de l'eau et un dispersant, par exemple l'argile
- Peuvent donner un engrais complet plus concentré que les engrais dissous
- Nécessité d'agiter le mélange pour le maintenir en suspension et de recourir à du matériel spécial pour la manutention et l'épandage

Les suspensions représentent une partie presque négligeable du marché des engrais en Ontario. Même si elles ont déjà

été populaires dans l'Ouest canadien, leur utilisation est en déclin.

Sources d'éléments nutritifs secondaires

En Ontario, il arrive que les sols aient besoin d'éléments nutritifs secondaires. Le cas échéant, ils peuvent être ajoutés à un mélange d'engrais ou à la chaux destinée à corriger l'acidité du sol. Le tableau 8-3 présente les sources les plus courantes d'éléments nutritifs secondaires et d'oligo-éléments.

Tableau 8-3. Sources courantes d'éléments nutritifs secondaires et d'oligo-éléments

Élément nutritif	Source	Pourcentage de l'élément nutritif	Autres éléments nutritifs	Épandage	
				au sol	foliaire
calcium (Ca)	chaux calcitique	22-40 %		oui	non
	chaux dolomitique	16-22 %	6-13 % Mg	oui	non
	gypse (CaSO ₄ · 2H ₂ O)	23 %	19 % S	oui	non
	chlorure de calcium (CaCl ₂)	36 %	64 % Cl	oui	oui
	nitrate de calcium (Ca(NO ₃) ₂)	19 %	15,5 % N	oui	oui
	chaux granulaire	16-40 %	0-13 % Mg	oui	non
	poussière des fours à ciment	26-32 %	2-9 % K ₂ O	oui	non
magnésium (Mg)	chaux dolomitique	6-13 %	16-22 % Ca	oui	non
	sels d'Epsom (MgSO ₄)	9 %	13 % S	oui	oui
	sulfate de potassium-magnésium	11 %	22 % K ₂ O; 20 % S	oui	non
soufre (S)	sulfate d'ammonium	24 %	34 % N	oui	non
	sulfate de potassium	18 %	50 % K ₂ O	oui	non
	sulfate de potassium-magnésium	22 %	22 % K ₂ O; 11 % Mg	oui	non
	sulfate de calcium	19 %	23 % Ca	oui	non
	soufre granulaire	90 %	–	oui	non
bore (B)	divers produits granulaires	12-15 %	–	oui	non
	Solubor™	20 %	–	non	oui
cuivre (Cu)	sulfate de cuivre	25 %	–	oui	non
	chélates de cuivre	5-13 %	–	non	non
manganèse (Mn)	sulfate de manganèse	28-32 %	–	non	oui
	chélates de manganèse	5-12 %	–	non	oui
molybdène (Mo)	molybdate de sodium	39 %	–	non	oui
zinc (Zn)	sulfate de zinc	36 %	–	oui	oui
	oxysulfate de zinc	8-36 %	–	oui	non
	chélates de zinc	9-14 %	–	non	oui

Calcium

La chaux (calcitique ou dolomitique) est la source de calcium la plus répandue. Certaines carrières et certains fabricants de ciment offrent des sous-produits à base de chaux qui contiennent des quantités importantes de potassium (p. ex. de 3 % à 9 %), de magnésium et de soufre sulfate. Il faut soigneusement tenir compte des différences d'indice agricole et de la teneur en éléments nutritifs supplémentaires qui peut être exigée pour un champ donné.

La chaux est utilisée pour augmenter le pH des sols acides. Pour être efficace, elle doit être finement broyée. La chaux se vend en poudre ou en granulés obtenus à partir de chaux finement broyée. La solubilité de la chaux chute rapidement à mesure que le pH du sol augmente.

Dans les sols neutres ou alcalins, le gypse (sulfate de calcium) est l'amendement calcaire à privilégier, car il est plus soluble que la chaux. Le gypse n'a aucun effet sur le pH du sol.

Le chlorure de calcium ou le nitrate de calcium servent occasionnellement de sources de calcium pour les pulvérisations foliaires.

Magnésium

La carence en magnésium survient plus fréquemment dans les sols acides. Les apports de chaux dolomitique destinés à corriger l'acidité du sol renferment suffisamment de magnésium pour corriger la carence. La solubilité de la chaux dolomitique diminue lorsque le pH du sol augmente et elle ne convient donc pas aux sols alcalins.

Dans les sols neutres ou alcalins, les sels d'Epsom (sulfate de magnésium) ou le sulfate de potassium-magnésium peuvent être utilisés pour les apports supplémentaires en magnésium.

Soufre

Le soufre, sous forme de sulfate, est présent dans un certain nombre d'engrais communs et peut être inclus dans un mélange d'engrais dans ces ingrédients. On utilise alors le plus souvent les ingrédients suivants : sulfate d'ammonium, sulfate de potassium et sulfate de potassium-magnésium. Le gypse (sulfate de calcium) peut aussi servir de source de soufre. La disponibilité du produit, les frais de transport et les autres éléments nutritifs nécessaires à la culture détermineront la source de soufre la plus économique.

Le soufre élémentaire granulaire (90 % de S) peut être une autre source de cet élément. Il amène lui aussi une acidification du sol. Le soufre doit être oxydé et transformé en sulfate pour être assimilable par les cultures, ce qui peut prendre plusieurs mois. Comme certains des produits intermédiaires du processus d'oxydation peuvent être toxiques pour les cultures, les épandages de fortes doses doivent se faire en pleine surface plutôt qu'en bandes.

Sources d'oligo-éléments

Puisque les quantités d'oligo-éléments nécessaires et épandues sont relativement petites, il est important que les applications soient uniformes. Les principales catégories de produits contenant des oligo-éléments sont des granules destinées à être mélangées à des engrais granulaires, et des liquides ou des poudres solubles destinés aux applications foliaires. La forme à privilégier dépend de l'élément nutritif spécifique ainsi que de la culture et des conditions du sol.

Les oligo-éléments granulaires sont mélangés à d'autres ingrédients des engrais en vue d'être épandus en pleine surface ou de servir d'engrais de démarrage. La compatibilité avec les autres ingrédients est importante, tant sur le plan chimique que sur celui de la granulométrie. Comme nombre d'oligo-éléments sont phytotoxiques en trop grande quantité, il faut éviter la ségrégation des constituants des mélanges.

Oxysulfates

- Les oxysulfates sont des combinaisons des formes oxyde et sulfate de l'oligo-élément
- Les sulfates sont beaucoup plus solubles et plus assimilables que les oxydes
- Les oxydes sont beaucoup plus stables dans un produit mélangé
- Les oxydes ne sont que lentement assimilables par les cultures.

Ces produits perdent de leur popularité, car leur biodisponibilité et les gains de rendement qu'ils procurent ne sont pas constants.

Sulfates

- Assez solubles
- Tendent à être hygroscopiques et peuvent provoquer des problèmes d'agglutination s'ils sont mélangés à d'autres ingrédients fertilisants

Malgré ces réserves, leur biodisponibilité constante explique leur présence fréquente dans les mélanges d'engrais.

Oligo-éléments liquides et solubles

Ces produits peuvent être mélangés avec de l'eau et pulvérisés sur le feuillage ou incorporés à des engrais liquides utilisés comme engrais de démarrage.

Chélates

- Molécules organiques complexes qui se lient à des ions métalliques et les maintiennent ainsi sous des formes solubles, ce qui les empêche de réagir avec d'autres minéraux pour former des composés insolubles
- La chélation permet à nombre de ces éléments nutritifs d'être mélangés avec des engrais liquides sans former de précipités insolubles
- Peuvent augmenter la biodisponibilité des éléments nutritifs dans le sol
- Les agents chélateurs les plus souvent utilisés sont l'EDTA et le DTPA
- D'autres substances organiques (acides humiques, ligninesulfonates, glucoheptonates) peuvent se lier à des ions métalliques, mais pas aussi étroitement que les vrais chélates.

Les chélates sont beaucoup plus coûteux que les autres formes solubles d'oligo-éléments. On doit les utiliser avec prudence puisqu'ils peuvent complexifier les minéraux déjà présents dans le sol et aggraver des carences.

Poudres hydrosolubles

- La forme d'oligo-éléments destinés aux pulvérisations foliaires la moins coûteuse et celle qui offre la fiabilité la plus constante
- La plupart de ces poudres exigent un pulvérisateur à même de fournir une bonne agitation de manière à maintenir la poudre en solution
- Il faut un mouillant-adhésif pour que l'élément nutritif passe à travers la cuticule et pénètre dans la feuille

Poudres dispersibles sèches

- Poudres conçues pour être utilisées dans des épandages de mélanges de granules sèches et qui sont épandues par le mélangeur d'engrais au détail

- Le taux d'inclusion par tonne est fixé par le fabricant afin de garantir le bon taux d'épandage et de réduire le dépoussiérage
- L'excès de poussière peut être dû au dépassement des recommandations du fabricant et au brassage excessif du mélange
- Les forces statiques font coller la matière aux granules d'engrais, et chaque granule reçoit par conséquent l'élément nutritif
- Beaucoup plus coûteuses sur une base nutritive qu'une autre matière granulaire sèche; cependant, un rendement amélioré à des taux d'inclusion inférieurs peut en justifier l'utilisation
- Chaque granule dans le mélange est enduite avec l'oligo-élément pour une meilleure distribution de l'épandage

Enduits liquides des oligo-éléments

- Comme pour les poudres dispersibles sèches, certains fabricants ont des matières liquides soit dans une formulation à base de latex ou d'huile conçue pour être vaporisée sur un engrais granulaire
- Ces enduits sont professionnellement appliqués par les mélangeurs au détail et exigent généralement une couverture chauffante sur les chariots de liquide durant les températures froides et du matériel de mesure spécialisé pour une application adéquate
- Puisqu'ils sont liquides, il n'y a pas de dépoussiérage potentiel, mais il y a des restrictions aux doses d'inclusion appliquées par tonne
- Des essais à la ferme sont une bonne façon de comparer ou de confirmer les rendements du produit

Produits destinés à améliorer l'efficacité des engrais

Azote

La plus grande partie des produits conçus pour améliorer le rendement du prélèvement de l'azote retardent la libération de ses formes minérales, l'ammonium et le nitrate. Un sondage sur la consommation d'engrais de 2016 réalisé par Stratus Ag Research, a conclu que 22 % des producteurs de maïs de l'Est canadien utilisaient un stabilisateur d'azote ou une certaine forme de ce produit (Stratus Ag Research, 2016). Ces produits entrent dans une ou plusieurs des catégories suivantes :

- **Engrais à libération lente ou contrôlée.**
Engrais qui contiennent de l'azote sous une forme qui en retarde la biodisponibilité, de sorte que l'azote est assimilable sur une plus longue période que lorsqu'il provient d'engrais ordinaires à base d'ammonium, de nitrates ou d'urée. Le délai dans la libération peut être obtenu par une variété de mécanismes, notamment des enduits de polymère ou de soufre, des occlusions ou par l'incorporation de l'azote dans des composés qui sont insolubles ou qui doivent d'abord être minéralisés avant de libérer l'azote. Certains produits sont offerts en différentes formulations qui s'assortissent de vitesses de libération variables. Chaque produit est toutefois conçu pour une application particulière et une culture précise.
- **Inhibiteurs de l'uréase.** Il s'agit de substances qui inhibent l'action hydrolytique sur l'urée par l'enzyme uréase. L'Agrotain, qui renferme du N-triamide de l'acide thiophosphorique (NBPT) en est un exemple.
- **Inhibiteurs de la nitrification.**
Substances qui inhibent l'oxydation biologique de l'ammonium en nitrate. N-Serve (nitrapyrine) et le

DCD (dicyandiamide) en sont des exemples. Le thiosulfate d'ammonium inhibe aussi la nitrification dans une certaine portée.

- **Engrais stabilisés.** Un stabilisateur d'azote est une substance qu'on ajoute à un engrais et qui a pour effet de prolonger la période pendant laquelle l'engrais reste sous forme d'urée ou sous forme ammoniacale. Le SuperU, un engrais à base d'urée renfermant à la fois du NBPT (un inhibiteur de l'uréase) et du DCD (un inhibiteur de la nitrification).

Une recherche menée par le D^r Craig Drury du ministère de l'Agriculture et de l'Agroalimentaire (AAC) à la ferme expérimentale de Woodslee dans le comté d'Essex en 2013 et en 2014 a démontré l'efficacité de certains des produits qui précèdent. Le chercheur a montré que l'utilisation combinée d'un inhibiteur d'uréase et de nitrification avec une fertilisation azotée pour le maïs réduit les pertes par volatilisation et production d'oxyde nitreux (Drury et coll., 2017). L'avantage dépend de la combinaison précise des conditions de gestion, du sol et de la météo. Règle générale, les inhibiteurs d'uréase et de nitrification peuvent aider :

- à minimiser la concentration d'azote inorganique dans le sol susceptible d'être perdu;
- à éviter les investissements en capital dans du matériel spécialisé de mise en place de l'engrais;
- à offrir plus de souplesse dans le choix du moment des épandages;
- à réduire les pertes potentielles dues à la volatilisation;
- à saisir plus de rendement potentiel en réduisant le risque de perte d'azote;
- à réduire la perte dans l'environnement par des voies comme le lessivage et la dénitrification.

Retarder la libération de l'azote peut avoir des désavantages si l'utilisation de ces matières n'est pas soigneusement planifiée. La plupart des engrais sont offerts sous une forme soluble afin de maximiser leur biodisponibilité. Ce n'est qu'en présence de situations particulières — lorsque la quantité épandue dépasse ce que la plante peut prélever dans un délai raisonnable — que les matières qui précèdent amélioreront l'efficacité.

Phosphore

Les produits conçus pour améliorer l'efficacité des prélèvements de P empêchent la fixation du P dans le sol. Ces produits comprennent des matières organiques ou humiques et des revêtements de polymère qui réduisent la vitesse de diffusion depuis la granule jusqu'aux sites de fixation dans le sol. Par exemple, du monophosphate d'ammonium de formule 11-52-0 enduit d'un copolymère itaconique maléique (AVAIL[®]) a été commercialisé en Amérique du Nord pendant plus de 25 ans.

Dans certaines conditions de sol, le ralentissement de la libération du phosphate pourrait éventuellement réduire les réactions de fixation qui rendent le P épandu non assimilable. Par exemple, Garcia et coll. (1997) ont conclu que le phosphate d'urée ou le superphosphate triple enduit de lignine a augmenté la biodisponibilité du P dans un sol fixateur de P hautement calcaire, tandis que ni le superphosphate ni le diphosphate d'ammonium non enduits ne l'ont augmentée. Toutefois, le moment de la libération est un facteur critique pour la plupart des engrais de démarrage. La plupart des grandes cultures ont besoin que du P assimilable soit libéré au profit des plantules dans les quelques semaines qui suivent l'ensemencement.

Certains produits inoculent le sol avec des microorganismes qui prétendent rendre le phosphore et les autres éléments nutritifs plus assimilables. L'introduction récente des traitements de semences *Penicillium bilaii*, *Bacillus amyloliquefaciens* et *Trichoderma virens* fait partie d'une industrie émergente de produits biologiques. Des essais à la ferme pour déterminer l'efficacité de ces produits dans votre propre exploitation sont la meilleure manière de valider leur rendement.

Produits destinés à l'agriculture biologique

Bon nombre des produits énumérés ci-dessus ne sont pas homologués pour une utilisation en agriculture biologique. Selon l'Office des normes générales du Canada, les produits utilisés en agriculture biologique pour améliorer la fertilité des sols doivent être d'origine végétale, animale, microbienne ou minérale et peuvent être soumis à des procédés physiques, enzymatiques ou microbiens. Puisque la plupart des engrais à base d'azote, de potassium et de phosphate subissent un certain degré de transformation chimique, ils ne sont pas considérés comme des éléments d'origine naturelle. Certaines formules de phosphate naturel, de chlorure de potassium, de sulfate de potassium et de sulfate de potassium-magnésium font exception. Pour une liste détaillée des substances autorisées, communiquer avec l'Office des normes générales du Canada.

Mélanges d'engrais

Les premiers engrais mélangés ont été sur le marché pendant une grande partie du 20^e siècle, mais les formes primitives laissaient beaucoup à désirer. Pendant nombre d'années, les engrais étaient livrés à la ferme en poudres fines conservées dans des sacs de papier. Ces poudres avaient tendance à bloquer le

matériel d'épandage ou à s'agglutiner en présence d'humidité.

Dans les années 1950, les mélanges d'engrais granulés ont fait leur apparition en Ontario. Ces produits incorporent les mêmes matières premières dans un granulé comprenant plusieurs éléments nutritifs. Le matériel pour produire ces mélanges granulés était cependant encombrant et coûteux, et les mélanges d'engrais granulés ont rapidement été remplacés par les mélanges d'engrais en vrac.

La préparation d'un mélange d'engrais en vrac consiste à mélanger divers engrais granulés entre eux dans les proportions voulues. En Ontario, ces opérations sont généralement effectuées par des mélangeurs au détail.

Ils réalisent des mélanges à la carte en fonction des besoins agronomiques uniques de chaque champ. Un mélange à la carte, ou formule-client, s'obtient en mélangeant les divers granulés de façon à obtenir une formulation composée conforme aux recommandations de fertilisation établies pour un champ et une culture donnés.

Les mélanges à la carte sont efficaces pour les raisons suivantes :

- ils fournissent la quantité exacte d'éléments nutritifs nécessaires à la culture;
- ils sont moins susceptibles d'absorber l'humidité et de s'agglutiner pendant l'entreposage;
- ils minimisent le coût de la fertilisation avec des matières à haute teneur en éléments nutritifs, sans additifs.

Inconvénients des mélanges

Les mélanges en vrac, et plus particulièrement les mélanges à la carte, présentent quelques inconvénients. L'épandage de faibles doses d'engrais à haute teneur en éléments nutritifs exige d'utiliser des systèmes de mesure appropriés. Des systèmes de distribution d'air sont souvent utilisés pour épandre les doses exigées avec précision.

Pour certaines applications, il y a des avantages à utiliser des engrais composés où chaque granulé renferme plusieurs éléments nutritifs. Mentionnons à titre d'exemple les engrais de démarrage qui contiennent de petites quantités d'oligo-éléments et les engrais pour pelouses résidentielles. Ces engrais homogénéisés assurent une répartition uniforme de tous les éléments nutritifs et sont pratiques à utiliser. Le seul inconvénient qu'ils présentent, toutefois, est d'être offerts selon des ratios d'éléments nutritifs fixes et d'être par conséquent difficiles à adapter aux besoins révélés par les analyses de sol.

Compatibilité physique et chimique des constituants des mélanges

Les engrais sont généralement compatibles les uns aux autres tant qu'ils demeurent secs.

Il existe pourtant certaines exceptions.

- Ne pas mélanger du nitrate d'ammonium avec de l'urée. Si ces deux substances sont mises en présence l'une de l'autre, le mélange est tellement hygroscopique (absorbe tellement l'humidité de l'air) qu'il devient en un rien de temps une bouillie inutilisable. Il faut prendre des mesures pour éviter la contamination croisée pendant l'entreposage et la manutention. Avant de mettre ensemble deux engrais mélangés, en

vérifier les ingrédients pour s'assurer de ne pas mettre en présence du nitrate d'ammonium et de l'urée.

- Ne pas mélanger de superphosphate simple ou triple avec de l'urée. Les superphosphates (0-20-0 ou 0-46-0) peuvent réagir avec l'urée, surtout s'ils ne sont pas secs et durs. Si cette réaction s'enclenche, l'urée est dégradée et le mélange devient collant.
- Épandre dès que possible les mélanges contenant du superphosphate et du diphosphate d'ammonium. Les superphosphates simples ou triples peuvent réagir avec du diphosphate d'ammonium en présence d'humidité. Le mélange devient alors collant et finit par s'agglutiner.

NE PAS MÉLANGER

- NITRATE D'AMMONIUM avec de l'URÉE
- SUPERPHOSPHATE avec de l'URÉE

Épandre dès que possible les mélanges contenant des oligo-éléments

Certains ingrédients des oligo-éléments (particulièrement les sulfates) peuvent absorber l'humidité de l'air.

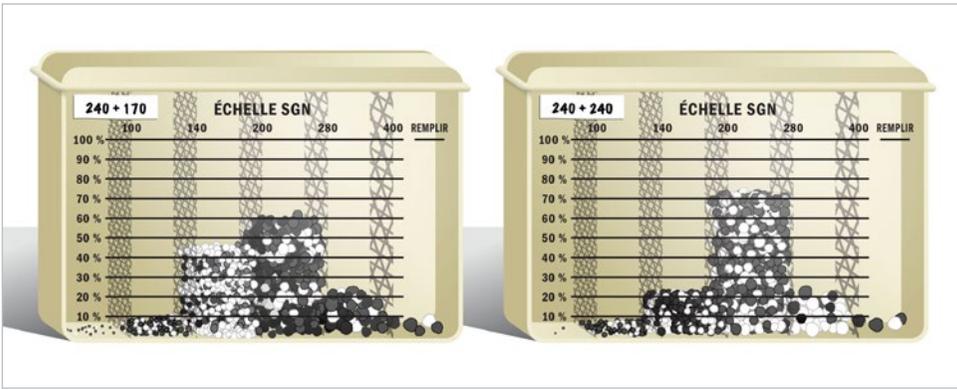


Figure 8–1. Test de ségrégation

Importance de l'uniformité dans le calibre des granulés

Lors de la préparation et de l'épandage de mélanges en vrac, il est de toute première importance que le calibre des granulés soit uniforme. Si leur taille varie, un tri s'opérera lors de leur écoulement dans la trémie; les granulés les plus gros iront vers l'extérieur du tas et les plus petits, vers le centre. Cette ségrégation peut entraîner une forte variation de la composition de l'engrais dans les diverses parties du tas.

Le calibre des granulés influence également le profil d'épandage de l'engrais. Des tests menés par la Tennessee Valley Authority ont permis d'observer une plage de largeurs de travail d'épandage allant de 10,5 m (35 pi), pour les granulés d'un diamètre de 1,7 mm, à 19,5 m (65 pi), pour les granulés d'un diamètre de 3 mm. Si les constituants du mélange sont de calibres différents, l'épandage des divers ingrédients ne sera pas uniforme.

Le mélangeur doit donc absolument utiliser des granulés de même calibre. L'Institut canadien des engrais fait la promotion depuis 1986 du système SGN, un système de numérotation qui permet d'identifier le calibre des granulés.

Les numéros du système SGN correspondent au diamètre moyen des granulés, mesuré en millimètres et multiplié par 100. Ainsi, un numéro SGN de 280 signifie que la moitié de l'échantillon d'engrais est retenue par un tamis d'essai d'une ouverture de mailles de 2,80 mm. Le numéro SGN et l'indice d'uniformité, qui mesure l'uniformité du calibre des granulés, sont les deux critères employés pour simplifier le choix de granulés de calibres compatibles.

La figure 8–1 illustre bien la ségrégation qui s'opère quand des granulés de calibres différents sont mélangés. Un mélange d'engrais fait avec les matières dans la boîte étiquetée « SGN 240 + 170 » présentera une ségrégation importante dans la trémie à engrais, ce qui entraîne un épandage non uniforme des éléments nutritifs dans le champ.

La boîte marquée 240 + 240 ne révèle aucune ségrégation. La boîte marquée 240 + 170 révèle cependant une ségrégation entre les granulés blancs SGN 170 et les granulés gris SGN 240.

Calculs des formules

Un mélange à la carte est un produit formulé pour correspondre exactement aux recommandations de fertilisation. La formule n'est rien de plus qu'une recette élaborée à partir des granulés disponibles de manière à fournir aux plantes les éléments nutritifs voulus.

Les mêmes calculs fonctionnent avec toutes les combinaisons d'ingrédients, mais la plupart des mélangeurs d'engrais ont une gamme limitée d'ingrédients. Cela comprend habituellement une source de N (46-0-0, 27-0-0, etc.), une source de P (11-52-0, etc.) et une source de K (0-0-60, 0-0-62, etc.).

Les analyses exactes des ingrédients peuvent varier selon la source, ce qui fait qu'il importe de savoir quels sont les ingrédients disponibles. Certains mélangeurs stockent également des ingrédients spécialisés pour certaines cultures comme le tabac.

Le calcul le plus important consiste à déterminer la quantité d'engrais nécessaire pour offrir aux plantes chaque élément nutritif. Pour cela, il faut utiliser la proportion de chaque élément nutritif dans l'ingrédient. (La proportion étant le pourcentage divisé par 100. Par exemple, 46 % devient 0,46). Calculer la quantité d'ingrédients nécessaire en divisant la quantité d'éléments nutritifs requise par la proportion d'éléments nutritifs présents dans l'ingrédient. Un exemple est présenté dans la feuille de calcul A. Une feuille de calcul vierge peut être trouvée à l'annexe A.

Pour calculer les mélanges d'engrais contenant N et P, on procède de la même façon que pour les mélanges N-K ou P-K, si ce n'est qu'on voudra tirer parti des économies possibles offertes par le MPA et le DPA. Cela rajoute quelques étapes au processus, puisqu'il faudra calculer

la quantité d'ingrédient pour satisfaire un besoin, puis déduire l'apport de cet ingrédient de l'autre besoin (consultez la feuille de calcul B et l'annexe B).

Le premier calcul effectué dépend du ratio N:P nécessaire et du type de phosphate d'ammonium choisi (MPA ou DPA).

En règle générale, on commence par le calcul visant le P s'il s'agit d'un engrais à forte teneur en N (engrais avec plus d'une partie de N pour deux parties de P). On commence par le calcul visant le N s'il s'agit d'un engrais présentant un ratio N:P de 1:4 et moins.

Des logiciels et des applications pour téléphone intelligent existent pour faciliter ces calculs. Un logiciel de planification de la gestion des éléments nutritifs (rendez-vous à ontario.ca/cultures et cherchez la suite d'outils de planification agricoles AgriSuite) peut servir à créer des plans pour les éléments nutritifs à l'aide des mélanges d'engrais ou des sources de fumier les plus fréquemment disponibles.

Feuille de calcul A

Exemple pour un mélange d'engrais N-K ou P-K

1. Dresser la liste des ingrédients disponibles et des formules.

Ingrédient	Formule
urée	46-0-0
superphosphate triple	0-46-0
chlorure de potassium	0-0-60

2. Calculer le besoin en élément nutritif (kg/ha de N-P₂O₅-K₂O) : **130-0-90**

3. Calculer la quantité de l'ingrédient nécessaire pour combler les besoins en chaque élément nutritif. Répéter pour chaque élément nutritif :

Besoin en élément nutritif ÷ proportion de l'élément nutritif = quantité de l'ingrédient
130 ÷ 0,46 = 283

Besoin en élément nutritif ÷ proportion de l'élément nutritif = quantité de l'ingrédient
90 ÷ 0,60 = 150

4. Ajouter le poids des ingrédients et calculer les apports d'éléments nutritifs.

Matière	Poids	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Urée	283 kg	130	0	0
KCl	150 kg	0	0	90
Total	433 kg	130	0	90

Le poids total du mélange à ce point est la dose. Les unités seront les mêmes que pour les besoins initiaux en éléments nutritifs.

5. Calculer la quantité totale d'engrais nécessaire.

Dose × taille du champ = poids total de l'engrais
433 kg/ha × 20 ha = 8 660 kg

6. Rajuster le poids des ingrédients pour obtenir la formule en kilogrammes/tonne.

Diviser le poids de chacun des ingrédients par le poids total et multiplier par 1 000.

Matière	Poids	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Urée	654 kg	301	0	0
KCl	346 kg	0	0	208
Total	1 000 kg	301	0	208
Formule (diviser par 10 les totaux N, P et K)	—	30,1	0	20,8

L'annexe A renferme des feuilles de calcul vierges à reproduire et à utiliser.

Feuille de calcul B. Exemple pour un mélange d'engrais NPK

1. Dresser la liste des ingrédients disponibles et des formules.

Ingrédient	Formule
Urée	46-0-0
Monophosphate d'ammonium (MPA)	11-52-0
Superphosphate triple	0-46-0
Chlorure de potassium	0-0-60

2. Préciser les besoins en éléments nutritifs (ou le ratio ou la formule désirés) :
90-90-110 lb/acre

3. Calculer la quantité de l'ingrédient (MPA) nécessaire pour combler le besoin en N (ratios de P élevés) ou en P (ratios de N élevés).

besoin en élément nutritif ÷ proportion de l'élément nutritif = quantité de MPA (lb/acre)
90 ÷ 0,52 = 173

4. Calculer l'apport de l'ingrédient aux autres éléments nutritifs.

ingrédient nécessaire × proportion de l'élément = apport **173 x 0,11 = 19**

5. Déduire la contribution du besoin pour déterminer le besoin résiduel en élément nutritif.

(Remarque : si l'apport est supérieur au besoin, c'est que le calcul fait en premier visait le mauvais élément nutritif. Reprendre à l'étape 3.)

besoin – apport = besoin résiduel **90 – 19 = 71**

6. Déterminer la quantité de l'ingrédient nécessaire pour répondre au besoin résiduel (source de N ou source de P).

besoin résiduel ÷ proportion de l'élément nutritif = quantité de l'ingrédient
71 ÷ 0,46 = 154

7. Préciser la quantité de chlorure de potassium nécessaire pour répondre au besoin en K.

besoin en K ÷ proportion de l'élément nutritif = quantité de l'ingrédient
110 ÷ 0,60 = 183

8. Calculer de la même façon tous les ingrédients nécessaires pour chacun des autres oligo-éléments.

9. Ajouter le poids des ingrédients et calculer les apports d'éléments nutritifs.

Matière	Poids	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
MPA	173	19	90	0
Urée	154	71	0	0
Potasse	183	0	0	110
Total	510	90	90	110

Le poids total du mélange à ce point est la dose. Les unités seront les mêmes que pour les besoins initiaux en éléments nutritifs.

10. Calculer la quantité totale d'engrais nécessaire.

$$\begin{array}{rcl} \text{dose} & \times & \text{taille du champ} & = & \text{poids total de l'engrais} \\ \mathbf{510 \text{ lb/acre}} & \times & \mathbf{40 \text{ acres}} & = & \mathbf{20\ 400 \text{ lb (9\ 251 \text{ kg})}} \end{array}$$

11. Rajuster le poids des ingrédients pour obtenir la formule en kilogrammes/tonne.

Diviser le poids de chacun des ingrédients par le poids total (dans le tableau à la 9^e étape) et multiplier par 1 000.

Matière	Poids (kg)	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
MPA	339	37	176	0
urée	302	139	0	0
potasse	359	0	0	215
Total	1 000	176	176	215
Formule (diviser par 10 les totaux N, P et K)	—	17,6	17,6	21,5

Il est maintenant possible de calculer le prix de l'engrais.

L'annexe B renferme un formulaire vierge à reproduire et à utiliser.

Aspects juridiques

L'Agence canadienne d'inspection des aliments surveille et vérifie les engrais et suppléments vendus ou importés au Canada. L'objectif de la *Loi sur les engrais* et de son règlement d'application est de s'assurer que les engrais et les suppléments sont sécuritaires, efficaces et annoncés correctement dans le marché.

La plupart des engrais et suppléments sont réglementés, même si l'homologation n'est pas exigée pour tous ces produits. Les oligo-éléments, les engrais-pesticides et les suppléments qui n'apparaissent pas à l'annexe II de la *Loi sur les engrais* et de son règlement d'application (comme les régulateurs de croissance des végétaux, les conditionneurs de sol, les agents mouillants et les inoculants microbiens, etc.) doivent être homologués avant de pouvoir être légalement importés ou vendus au Canada.

Tous les produits doivent être sans danger pour les plantes, les animaux, les humains et l'environnement. Ils doivent être efficaces et être étiquetés convenablement. Les renseignements qui doivent minimalement apparaître sur l'étiquette d'un engrais ou d'un supplément sont le nom, la formule (s'il y a lieu), la marque (s'il y a lieu), le nom et l'adresse du fabricant ou du détenteur d'homologation, le numéro de lot (s'il y a lieu), le numéro d'homologation (le cas échéant), la composition garantie, le mode d'emploi (le cas échéant), le poids du produit et les précautions à prendre. Des éléments d'information supplémentaires peuvent être exigés sur l'étiquette de certains engrais et suppléments de spécialité. La composition des produits doit correspondre à la composition garantie indiquée sur l'étiquette, celle-ci étant sujette à une surveillance et à une inspection.

Bien des fabricants d'engrais et mélangeurs font partie du Programme canadien de vérification de la qualité des engrais (PCVQE). En vertu de ce programme, les participants prélèvent leurs propres échantillons et les envoient à un laboratoire accrédité qui présente les analyses à l'Agence canadienne d'inspection des aliments. Les résultats sont calculés, et chaque fabricant ou usine de préparation des engrais qui présente un nombre minimal d'échantillons requis se voit attribuer une cote de rendement. Ces cotes sont publiées annuellement dans le Rapport canadien de vérification de la qualité des engrais, qui est largement diffusé. Un client peut demander de connaître la cote accordée à un fournisseur dans ce rapport.

Pour de plus amples renseignements, communiquer avec le Service des engrais, Agence canadienne d'inspection des aliments, www.inspection.gc.ca.

Tous les engrais doivent être correctement étiquetés, qu'ils soient homologués ou non. Les renseignements qui apparaissent sur l'étiquette doivent inclure le nom, la formule, la proportion minimale exigée, le fabricant, le conditionneur et le poids du produit. Certains types particuliers de produits ont besoin de renseignements supplémentaires. La composition des produits doit correspondre à la composition garantie indiquée sur l'étiquette, celle-ci étant sujette à une surveillance et à une inspection.

Épandage d'engrais

L'objectif de tout programme de fertilisation est d'améliorer le rendement et la qualité des cultures en leur procurant les éléments nutritifs dont elles ont besoin. Si l'engrais n'est pas mis en place à l'endroit où les racines peuvent l'atteindre ni quand la culture en a besoin, l'exercice sera vain.

La localisation de l'engrais est une solution de compromis entre l'épandage de l'engrais en concentrations optimales précisément à l'endroit et au moment où les plantes en ont besoin et les considérations pratiques liées au temps et au matériel dont on dispose pour réaliser l'épandage. Si un système d'épandage plus coûteux est envisagé, celui-ci doit, pour compenser, offrir des avantages, par exemple un meilleur rendement ou une réduction du coût des engrais.

La mise en place optimale pour un élément nutritif (ou une combinaison d'éléments nutritifs) en particulier dépend de la mobilité de l'élément nutritif dans le sol, de la concentration nécessaire aux cultures, de sa toxicité à fortes concentrations, de la texture et de l'humidité du sol, ainsi que de la culture visée.

Innocuité pour les cultures

Les tissus végétaux sont sensibles aux blessures infligées par de fortes concentrations salines (pression osmotique) ou l'ammoniac libre (les deux pouvant être le résultat d'une trop grande concentration d'engrais dans un volume de sol trop faible).

Symptômes des végétaux

Les brûlures causées par les engrais se manifestent par un système racinaire réduit et des zones noircies ou décolorées sur les racines, comme si elles avaient été

brûlées. Les blessures seront plus graves sur les plantules parce que les jeunes tissus sont plus sensibles, que de plus grandes proportions du tissu végétal sont atteintes, qu'il y a moins de réserve pour une nouvelle croissance après la blessure, et qu'il y a moins de possibilités de croissance de la plante autour de la zone de forte concentration.

La concentration est la clé

Les dommages causés par les engrais sont d'abord et avant tout le fait de concentrations trop fortes plutôt que de quantités totales épandues. Les engrais épandus en bandes sont plus susceptibles d'infliger des blessures que les engrais épandus en pleine surface.

Si l'engrais est épandu avec un semoir à maïs dans une bande de 2,5 cm (1 po) dans des rangs espacés de 0,75 m (30 po), la concentration dans la bande est 30 fois supérieure à ce qu'elle aurait été si l'engrais avait été épandu en pleine surface sur toute la zone. Par ailleurs, la distribution le long du rang n'est pas toujours uniforme, de sorte que la dose peut être beaucoup plus élevée à certains endroits.

La concentration peut être diluée si l'engrais se répand à l'extérieur de la bande, mais l'ampleur de la dilution dépend de la texture et de l'humidité du sol. Dans les sols humides, la dilution est plus forte. Les brûlures causées par les engrais sont fréquentes les printemps secs et dans des sols bien drainés à texture grossière. Comme les sols à texture grossière à faible teneur en matière organique offrent une moins grande surface de réaction avec l'engrais et d'adsorption de celui-ci, la concentration dans la solution de sol demeurera plus élevée que dans les sols argileux.

Proximité des végétaux

La proximité des semences ou des plants repiqués avec la bande fertilisée augmente aussi le risque de brûlure. Si l'engrais est trop proche, il a peu de chances d'être dilué par l'eau du sol. Les racines elles-mêmes ont peu de chances, sinon aucune, de croître au-delà de la zone de concentration. L'azote et le potassium peuvent particulièrement nuire aux plantules et à la germination des semences. Dans les sols froids, peu propices à la croissance racinaire, les effets peuvent être amplifiés.

Si l'engrais est épandu en bandes dans la raie de semis, la dose sécuritaire est bien inférieure à celle d'un engrais épandu en bandes à 5 cm sur le côté et à 5 cm au-dessous des semences. Même aux doses recommandées, l'engrais épandu dans la raie de semis ralentit légèrement la germination et la levée, puisque l'effet de relargage ralentit l'absorption de l'eau. L'épandage de l'engrais dans la raie de semis ne convient pas à toutes les cultures.

Types de dommages

Des dommages par le sel sont à craindre quand la concentration d'ions dans la solution de sol est supérieure à celle qu'on trouve à l'intérieur de la plante. L'eau est alors attirée à travers la membrane cellulaire, hors de la racine. Les tissus de la racine sont endommagés par dessiccation et semblent avoir été brûlés légèrement par de l'air chaud.

Tout composé soluble en concentration suffisamment forte entraînera des dommages causés par le sel. Plus un engrais est soluble, plus le risque de dommages par le sel est grand. Les acides et les hydroxydes risquent un peu moins de causer de tels dommages, mais ces ingrédients, tels qu'ils sont utilisés dans la fabrication des engrais, sont combinés à des composés solubles avant l'épandage.

L'ammoniac peut causer des dommages aux tissus quand on retrouve de l'ammoniac libre dans la solution de sol. Normalement, ce composé se dissout en ions ammonium, mais à fortes concentrations, et plus particulièrement dans des conditions d'alcalinité, une partie de l'ammonium se trouve libérée en ammoniac. Cela pourrait être le cas lors d'épandages d'ammoniac anhydre ou de fortes doses de fumier liquide, ou si de l'urée ou du diphosphate d'ammonium (DPA, 18-46-0) sont épandus en bandes près du rang. Les symptômes de dommages par l'ammoniac sont analogues à ceux qui sont causés par le sel et sont souvent concomitants.

Sensibilité de la culture

Les cultures ne sont pas toutes également sensibles aux dommages causés par les engrais. De façon générale, les graminées (monocotylédones) y sont beaucoup moins sensibles que les cultures à feuilles larges (dicotylédones). Parmi les graminées, les céréales sont plus tolérantes que le maïs aux fortes doses d'engrais épandus en bandes.

Chez les dicotylédones, le soya et les haricots comestibles sont plus sensibles que les légumineuses fourragères ou le canola, mais toutes ces cultures demeurent beaucoup plus sensibles que le maïs.

En règle générale, les légumes semés sont assez sensibles aux dommages causés par les engrais.

Méthodes d'application

Épandage en plein ou en pleine surface

L'épandage en pleine surface est de loin la méthode la plus rapide et la moins coûteuse. L'engrais est épandu uniformément à la surface du sol, puis, dans la plupart des grandes cultures, est incorporé au sol. Cette façon de procéder offre la meilleure dilution possible et réduit du coup les risques de brûlures par les engrais. L'épandage en pleine surface maximise également le contact entre l'engrais et le sol, ce qui entraîne des réactions d'immobilisation plus rapide que l'épandage en bandes.

La brûlure par l'engrais peut aussi survenir sur des sols très sableux pauvres en matière organique. De fortes doses d'urée et de potasse épandues sur ces sols peuvent causer des dommages aux plantules lors de sécheresses, en particulier combinées avec des engrais épandus en bandes ou épandus dans la raie des semis.

Qu'il soit épandu avec un épandeur à traction ou automoteur, il existe deux types de systèmes d'épandage de granules d'engrais : centrifuges et pneumatiques (à jet d'air). Les deux font du bon travail s'ils sont bien utilisés et entretenus.

Épandeurs centrifuges

Les épandeurs centrifuges utilisent un ou deux disques qui tournent rapidement avec des palettes qui expulsent les granules d'engrais de l'épandeur. Une dimension uniforme des granules est importante, parce que les particules plus petites ne se déplacent pas aussi loin et qu'elles se dispersent de façon non uniforme. Des conditions venteuses peuvent aussi perturber le profil d'épandage, tout comme l'accumulation d'engrais sur le distributeur ou les palettes. Même si des nettoyages

fréquents s'imposent, les parties à nettoyer sont facilement accessibles.

Les épandeurs centrifuges sont passablement simples sur le plan mécanique et relativement peu coûteux. La puissance nécessaire est modeste : tout tracteur capable de tirer l'épandeur dispose de suffisamment de puissance pour les centrifugeuses. Les épandeurs centrifuges sont ceux qu'on trouve le plus souvent dans les centres de location, en raison de leur faible coût, de leur fonctionnement habituellement sans problème et de la facilité avec laquelle ils peuvent être réparés au champ.

Épandeurs pneumatiques

Dans les épandeurs pneumatiques, un jet d'air à forte vélocité fait circuler les granulés le long d'une rampe jusqu'aux distributeurs espacés d'environ 1,7 m (5 pi). Ces épandeurs ont besoin de plus de puissance, car le ventilateur qui crée le flux d'air tourne à grande vitesse. Ces épandeurs sont également plus complexes en raison des pièces mobiles dans le ventilateur et du système de mesure qui distribue l'engrais uniformément à chacune des sections de rampe.

Toutefois, le dosage peut être plus précis que dans les épandeurs centrifuges et le mélange qui s'effectue dans le flux d'air permet d'ajouter de petites quantités d'herbicides granulaires ou d'oligo-éléments.

Les distributeurs étant relativement rapprochés, le vent influence moins la qualité d'épandage que dans le cas des épandeurs centrifuges. Les appareils automoteurs offrent souvent une largeur de travail d'épandage plus grande que les épandeurs centrifuges, ce qui permet des débits plus importants à partir de la même unité d'alimentation. Il est rare que la machine se bloque, en raison de la grande vitesse du flux d'air, mais

l'épandeur doit être surveillé davantage si le temps est humide ou que les granulés le sont.

Étant relativement coûteux et complexes, les épandeurs pneumatiques ne conviennent généralement pas à l'usage qu'en font les particuliers, mais occupent cependant la plus grande partie du marché pour l'épandage personnalisé.

Système Tru-Spread

Le système Tru-Spread fait appel à un convoyeur à vis sans fin qui distribue les granules d'engrais sur la largeur d'une rampe et qui les fait tomber dans des ouvertures espacées de 17,5 cm (7 po). Il procure un dosage assez précis et la qualité du travail n'est pas influencée par le vent.

Matériel de pulvérisation

La plupart des engrais épandus en pleine surface sont dans une forme granulaire, mais une quantité assez importante d'une solution azotée liquide est épandue au sol sur le blé d'automne. De petites quantités sont épandues en pleine surface comme support de l'herbicide pour le maïs.

Les pulvérisateurs procurent habituellement un épandage uniforme, mais ils obligent à composer avec les risques de dérive par temps venteux. Certains pulvérisateurs ne donnent pas d'aussi bons résultats lorsqu'ils servent à épandre des engrais liquides parce qu'ils ne sont pas conçus pour gérer de gros volumes ou subissent la corrosion causée par certains constituants des engrais.

Fertilisation à dose variable

Les épandeurs d'engrais à dose variable les plus simples sont les épandeurs traditionnels qui, quel qu'en soit le type, sont munis d'un récepteur GPS et d'une liaison au contrôleur. Ces dispositifs permettent d'épandre des doses variables de l'engrais ou du mélange d'engrais. Il arrive que plusieurs passages soient nécessaires pour répondre aux besoins en engrais d'un champ. Toutefois, le matériel est moins coûteux que les épandeurs à dose variable à plusieurs trémies. La nécessité de faire plusieurs passages a pour effet de ralentir les opérations et d'accroître le compactage du sol.

Dans le cas des épandeurs à dose variable à plusieurs trémies, chaque trémie peut être commandée individuellement. Cela permet en un même passage d'appliquer plusieurs produits suivant des doses variables.

L'épandage à dose variable de chaux peut être réalisé avec un épandeur de chaux équipé d'un récepteur GPS et d'une commande de variation des doses. Les zones d'épandage dans le champ peuvent aussi être cartographiées et marquées, et des doses précises être épandues sur chacune avec un épandeur de chaux classique par navigation à l'estime.

Épandage en bandes

L'épandage en bandes consiste à épandre de l'engrais dans une bande à côté et sous la semence dans le cas de cultures en rang ou des semis de céréales. Pour le maïs, une pratique fréquente consiste à épandre une bande de démarrage d'un engrais sec à une profondeur de 5 cm (2 po) à côté et sous l'ensemencement. Une erreur fréquente consiste à placer l'engrais à une profondeur de 5 cm (2 po) de la surface du sol. Le positionnement adéquat est 5 cm (2 po) sous la profondeur de la semence. Si la semence

est plantée à une profondeur de 5 cm (2 po), la bande de démarrage devrait être à une profondeur de 10 cm (4 po).

Ce type d'épandage nécessite l'installation sur le semoir en lignes ou le semoir de précision de trémies et de dispositifs de dosage et d'un organe ouvreur supplémentaire destiné à la mise en place de l'engrais. L'ajout de tout ce matériel qui alourdit le semoir peut nécessiter une plus grande puissance de remorquage en plus de ralentir le remplissage du réservoir d'engrais. L'avantage est que l'engrais est placé à une forte concentration là où il pourra être intercepté par les racines des jeunes plants. Cela est particulièrement important dans le cas du phosphore, qui est nécessaire au début de la croissance de nombreuses cultures.

La prudence est de mise avec l'épandage en bandes, car de fortes concentrations augmentent les risques de brûlures. Il faut limiter les doses d'azote et de potassium, surtout si de l'urée ou du diphosphate d'ammonium constitue la source d'azote. Le pH de la bande peut aussi influencer la biodisponibilité d'autres éléments nutritifs dans le sol — consultez l'encadré intitulé « pH du sol dans des bandes d'engrais de démarrage » au chapitre 3.

Il est aussi très important de bien régler le semoir de manière à déposer l'engrais à la bonne distance des semences. Si les organes ouvreurs viennent trop près de la raie de semis, les risques de brûlures augmentent. Si les organes ouvreurs s'en écartent trop, les plantules risquent de ne pas pouvoir intercepter assez tôt l'engrais.

Le matériel de dosage pour l'engrais épandu en bandes est assez simple, avec une vis sans fin déposée au fond des trémies qui fait tomber l'engrais par une vanne réglable. La dose peut être réglée avec la vitesse de la vis, le réglage

de l'ouverture ou l'inclinaison du plan de la vis. Il faut vérifier soigneusement l'alignement de la vis d'alimentation. Si elle est déportée d'un côté, elle peut laisser tomber jusqu'à 50 % plus d'engrais de ce côté de la trémie que de l'autre côté.

Épandage de l'engrais en contact avec la semence

L'engrais peut aussi être épandu directement avec la semence (technique désignée pop-up en anglais), même s'il retarde alors légèrement la germination. Cette méthode offre l'avantage de fournir des gains de rendement relativement élevés dans le maïs (jusqu'à 0,5 t/ha ou 8 boisseaux/acre selon une étude) avec de faibles doses d'engrais, même dans les sols avec des résultats d'analyse élevés où on ne s'attend pas à une réaction à un épandage d'engrais en bandes ou en pleine surface. Cette méthode assure également une augmentation constante de la vigueur des plantules.

En raison de l'étroite proximité de l'engrais et de la semence, cette méthode est celle qui comporte le plus grand risque de dommage. Il est donc primordial de ne pas dépasser les doses maximales sécuritaires (consultez le tableaux 8–6) et de veiller à ce que le matériel épande l'engrais uniformément. Les à-coups dans l'épandage d'engrais peuvent facilement entraîner une croissance de la culture sinueuse, puisque certaines zones reçoivent des concentrations d'engrais plus élevées que nécessaire alors que d'autres n'en reçoivent pas suffisamment.

Les engrais ainsi épandus sont surtout liquides, car ils sont faciles à doser avec précision et à manipuler. Pour éviter les à-coups, l'engrais doit être acheminé sous pression aux organes ouvreurs et dosé à travers un orifice. Il faut veiller à ce que le tube de distribution soit bien centré sur l'organe ouvrier. Si des gouttes d'engrais

liquide tombent sur les disques ouvreurs, il se formera de la boue qui obstruera les orifices.

Épandage en bandes latérales

L'épandage en bandes latérales consiste à épandre l'engrais, surtout l'azote, entre les rangs de la culture. Cette méthode permet de faire les apports d'azote à un moment qui coïncide avec celui où la culture en a besoin, ce qui augmente l'efficacité de l'utilisation de l'azote. L'épandage en bandes latérales réduit par ailleurs le risque de lessivage de l'azote dans les sols sableux ou le risque de dénitrification dans les sols mal drainés.

Dans les cultures de maïs, l'azote épandu en bandes latérales est le plus souvent sous forme d'ammoniac anhydre et de solution NAU.

L'ammoniac anhydre est intéressant en raison de son faible coût par unité d'azote, et il fournit également un avantage sur le plan de rendement par rapport à d'autres formes d'azote sur les sols argileux du sud-ouest de l'Ontario. Sous cette forme, il faut injecter l'azote à une profondeur suffisante dans le sol, afin de permettre à la fente d'injection de se refermer, sans quoi les pertes dans l'atmosphère seront trop élevées. L'épandage d'ammoniac anhydre nécessite davantage d'énergie, coûte plus cher et oblige à prendre des précautions pour pouvoir se faire en toute sécurité.

Comme les solutions de NAU n'ont pas à être injectées profondément dans le sol, leur application ne s'assortit pas de besoins importants en énergie. En présence d'une épaisse couche de résidus à la surface du sol, la solution doit être placée sous la couche de résidus afin d'éviter les pertes d'ammoniac par volatilisation. Malgré son coût relativement élevé, la NAU est largement utilisée, du fait de sa sécurité d'utilisation et de sa facilité de manutention.

Si les résidus de culture sont abondants, les couteaux injecteurs risquent de s'y accrocher et de les traîner. Pour remédier à cette situation, les épandeurs conçus pour le semis direct sont pourvus de coutres qui découpent les résidus et améliorent la pénétration du produit dans la terre ferme. Une autre approche consiste à utiliser l'injecteur à roue à rayon, qui injecte la solution azotée dans le sol en déplaçant le moins possible les résidus. Cette technologie donne d'assez bons résultats, mais coûte au départ plus cher que les autres types d'épandeurs en bandes latérales.

Les engrais granulaires sont utilisés pour la fertilisation en bandes latérales des cultures légumières et du tabac, mais ne sont pas très utilisés dans la culture du maïs.

Épandage en bandes en profondeur

Certains producteurs épandent les engrais à base de phosphore et de potassium en bandes, à une profondeur de 15 à 20 cm (de 6 à 8 po), surtout là où ils pratiquent le semis direct et le semis en bandes dans des sols fermes. Cela peut accroître la biodisponibilité des engrais par temps sec et les protège contre les réactions d'immobilisation. Des essais limités en Ontario n'ont cependant pas montré un gain de rendement à un épandage en bandes en profondeur. Il reste que ce type d'épandage peut être utile dans certaines situations.

Foliaire

Les engrais foliaires peuvent être un excellent complément aux engrais épandus au sol. Ils peuvent remédier rapidement à des carences et ne risquent pas de se fixer aux particules de sol. En revanche, ils risquent d'être emportés par l'eau ou de voir le support s'assécher avant que l'élément nutritif ne soit absorbé. L'utilisation de mouillant-adhésif peut accroître l'absorption de l'engrais par la cuticule.

À faibles doses, ces engrais ne risquent pas d'endommager les tissus. Par conséquent, il est plus facile de corriger des carences en oligo-éléments, quand il s'agit de quelques grammes seulement par hectare, que celles en macro-éléments. Par exemple, les applications foliaires de manganèse sont la façon la plus efficace de corriger les carences en manganèse.

Assurez-vous de vérifier l'étiquette des pesticides avant de mélanger des éléments nutritifs foliaires avec un pesticide en vaporisation. En particulier, l'antagonisme du manganèse et du glyphosate est notamment bien connu.

Les applications foliaires d'urée donnent de bons résultats dans bien des cultures. L'azote provenant de l'urée peut être appliqué sur les feuilles à des concentrations beaucoup plus grandes que le phosphore et le potassium. Choisir une formule compatible avec l'alimentation des animaux ou des usages foliaires, car la teneur en biuret est alors moins élevée et ne risque pas d'endommager les tissus végétaux. On dispose de peu de données de recherches sur les doses maximales sécuritaires, mais selon certaines études, la dose à ne pas dépasser pour une seule application foliaire d'urée serait de 22 kg de N/ha (20 lb/acre) à raison d'une concentration dans la bouillie inférieure à 2 %.

Même si l'urée est la source d'éléments nutritifs la plus facilement assimilable par les feuilles, il en faut souvent de nombreuses applications pour que les effets de l'apport d'azote soient manifestes. Pour cette raison, l'application foliaire de macro-éléments nutritifs a tendance à se justifier davantage dans les cultures horticoles de grande valeur que dans les grandes cultures courantes.

Moment du repiquage

Les solutions de démarrage sont obtenues à partir d'engrais hydrosolubles ou d'engrais liquides qui procurent une source d'éléments nutritifs à la masse racinaire. Ces solutions renferment toujours du phosphore, qui est important pour le développement des racines, et peuvent aussi renfermer de l'azote et du potassium.

Les végétaux repiqués tireront profit des éléments nutritifs rapidement assimilables qui favorisent la nouvelle croissance racinaire et aident à surmonter la crise de transplantation. Les plants repiqués reçoivent l'engrais de démarrage à même l'eau d'arrosage employée au moment du repiquage ou avant la mise en place au champ.

L'utilisation d'un engrais de démarrage lors du repiquage vise à obtenir les avantages d'une croissance précoce tout en évitant les dommages à la plante. Heureusement, le principal élément nutritif qui présente un intérêt dans un engrais de démarrage — le phosphore — est relativement sécuritaire. L'azote et les sels de potassium présentent davantage un risque. L'inclusion d'oligo-éléments dans une solution de démarrage augmente la toxicité potentielle pour les plants repiqués. Différents marques ou lots d'engrais de démarrage avec la même composition peuvent avoir une concentration variée en sel, selon les ingrédients utilisés pour les composer.

Il importe de savoir que la concentration en sel de la solution de repiquage peut varier dans la journée, lorsque les réservoirs sont remplis. La concentration de l'engrais peut aussi varier lorsqu'un système de dosage est utilisé.

Les concentrations en sel (conductivité électrique ou CE) sont souvent exprimées en fonction d'une certaine concentration d'engrais, par exemple 1,5 L dans 100 L d'eau. Le tableau 8-4 ci-dessous présente une comparaison entre plusieurs engrais de démarrage qui ont été testés par Janice LeBoeuf, une ancienne spécialiste de la culture des légumes du MAAARO.

Tableau 8-4. Comparaison de la conductivité électrique (CE) de solutions de démarrage de 1,5 % et de 2,5 % et de la teneur en éléments nutritifs du concentré d'engrais

Engrais ¹	CE	CE	g/L ou g/kg de concentré d'engrais			
	(mS/cm) 1,5 %	(mS/cm) 2,5 %	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N + K ₂ O
3-18-18	7,31	12,01	41	244	244	285
9-18-9	7,42	11,86	117	234	117	234
6-24-6	7,84	13,32	82	328	82	164
6-24-6	8,34	13,12	82	328	82	164
10-31-4 IBA & PHCA	10,12	16,16	131	407	52	184
10-34-0	10,22	15,16	131	446	0	131
10-50-10 (sec et soluble)	10,80	16,81	100	500	100	200
Eau	0,00	0,00	0	0	0	0

¹ CE d'un échantillon d'un lot particulier de chaque formule. Les engrais de la même composition peuvent présenter des concentrations en sel très variables. Testez toujours votre propre solution à l'aide d'un dispositif de mesure de la CE.

Recherchez une solution de démarrage qui vous fournira une dose adéquate de phosphore à une faible conductivité électrique et à un prix acceptable (vous aurez besoin de deux fois plus de produits à faible composition pour obtenir des concentrations en phosphore équivalentes à une solution de 1,5 % de 10-34-0). Souvenez-vous que la présence d'une certaine quantité d'azote ammoniacal offre un avantage, mais que le potassium et les oligo-éléments ne sont pas particulièrement utiles dans une solution de démarrage et peuvent accroître le risque de dommage.

Fertigation

La fertigation est une méthode d'application de l'eau et des éléments nutritifs par un système d'irrigation par goutte à goutte. Elle peut servir à augmenter le rendement et la qualité de plusieurs cultures légumières.

Une solution de réserve d'engrais soluble (formule de serre) est dissoute dans un réservoir et introduite par une valve dans le système d'irrigation par succion ou par pression. La solution d'engrais doit être introduite lentement dans le système.

Après que l'engrais soit passé dans le système, il faut continuer à irriguer afin de le vidanger.

NE PAS mélanger des engrais contenant du calcium, des phosphates ou des sulfates puisqu'ils peuvent se précipiter et obstruer les goutteurs.

Comblé par un épandage en pleine surface tout le besoin en phosphate et environ de 30 % à 50 % du besoin en azote et en potasse avant les semis. Le reste devrait être injecté par le système d'irrigation par goutte à goutte. Utilisez des analyses de sol pour cerner les besoins en phosphate et en potasse. Le tableau 8-5 décrit les doses recommandées pour les tomates, les poivrons et les cucurbitacées.

Tableau 8-5. Calendrier d'injection de l'azote et de la potasse

Stade de croissance	Dose de N et de K ₂ O à injecter chaque semaine (kg/ha)		
	cucurbitacées ¹	poivrons	tomates
du repiquage à la nouaison	5	3-5	2,5
du calibre des fruits à la récolte	10	7-10	5
récolte	5	3-5	2,5

¹ Concombres, melons, courges d'été

Combinaison de méthodes

Le choix de l'engrais de démarrage dépend de la culture, des besoins en minéraux et du matériel disponible. Il est souvent aussi efficace d'épandre une partie de l'engrais au démarrage de la culture et d'épandre le reste en pleine surface que d'épandre tout l'engrais à l'ensemencement. Les épandages fractionnés offrent certains avantages, notamment des économies de temps et de main-d'œuvre et la diminution des risques de voir les engrais endommager les plantules. L'intérêt récent envers le travail du sol par bandes offre une autre solution de rechange à la mise en place des engrais et du moment où elle doit avoir lieu.

Il faut déduire les apports d'engrais de démarrage et des engrais épandus en bandes latérales du total du besoin en minéraux. Ce qui reste doit être épandu en pleine surface. S'il reste très peu d'engrais à épandre, il est peut-être justifié de rajuster les doses de l'une des autres sources d'éléments nutritifs, en ignorant les petites quantités résiduelles ou en planifiant un épandage d'engrais qui répondra à des besoins sur plusieurs années (seulement pour P et K).

Feuille de calcul relative aux applications d'engrais

Une fois les besoins des cultures établis, il reste à déterminer de quelle façon combler ces besoins. Les préoccupations économiques et environnementales imposent que nous fassions le meilleur usage possible de toutes les sources d'éléments nutritifs. Cela comprend les formes organiques des éléments nutritifs, qu'ils soient déjà à la ferme ou qu'ils doivent être importés, ainsi que les engrais minéraux.

Doses maximales sécuritaires d'éléments nutritifs

Quelle que soit l'élément nutritif, ne jamais dépasser la dose maximale sécuritaire, afin d'éviter les dommages aux cultures. Les doses indiquées dans le tableau 8-6 peuvent entraîner l'apparition de symptômes de dommages ou des retards de croissance dans un maximum de 10 % des cas. Dans la mesure du possible, utiliser des doses moindres. Comme des dommages aux cultures sont à craindre quand les doses d'engrais sont trop fortes, le manque d'uniformité dans l'épandage peut causer des dommages par endroits même si la dose moyenne est suffisamment faible pour être sécuritaire.

La question de savoir quelles sont les doses sécuritaires dépend beaucoup de la dilution. Les dommages sont surtout observés par temps sec et dans des sols à texture grossière pauvres en matière organique.

Si les rangs sont plus étroits, la dose sécuritaire par hectare sera plus grande, car la même quantité d'engrais est alors épandue sur une plus grande longueur de rang.

Pour prévenir les dommages par les engrais, il est important de bien

entretenir le matériel. Si l'organe ouvreur de l'injecteur se déplace plus près des semences, une dose qui serait autrement sécuritaire risque de brûler les semences ou les plantules.

Source d'engrais et mise en place de l'engrais

Utilisez d'abord les sources d'éléments nutritifs que vous avez à la ferme puisqu'elles seront de toute façon épandues sur les champs, et dosez les épandages de manière à satisfaire les besoins de la culture en N ou P.

Plusieurs agriculteurs trouvent qu'il est profitable de fractionner les besoins en éléments nutritifs entre les sources organiques et minérales, ce qui offre une certaine assurance contre la variabilité des épandages de fumier. Des éléments nutritifs de source organique mais non agricole, comme les biosolides d'épuration et le compost municipal, peuvent être envisagés.

Les engrais chimiques servent à répondre aux besoins des cultures qui ne sont pas comblés par d'autres sources d'éléments nutritifs. Épandre les engrais chimiques aussi près que possible du moment où la culture a besoin des éléments nutritifs et aussi près du plant que possible.

Tableau 8–6. Doses maximales sécuritaires d'éléments nutritifs dans les engrais**LÉGENDE :** NR = non recommandé

– = aucune donnée

		N kg/ha			N + K ₂ O + S kg/ha		
		Espace entre les rangs			Espace entre les rangs		
		75 cm	38 cm	18 cm	75 cm	38 cm	18 cm
		30 po	15 po	7 po	30 po	15 po	7 po
épandu à 5 cm de la bande et à 5 cm (2 po × 2 po) sous la semence							
maïs ¹	urée	40	–	–	79	–	–
	autres engrais	52	–	–	117	–	–
soya ² , pois, haricots secs	sulfate d'ammonium	30	60	–	NR	NR	–
	autres engrais	NR	NR	–	90	180	–
avec la semence³							
maïs	autres engrais	NR	NR	–	10	20	–
blé d'automne, triticale, orge	autres engrais	–	–	15	–	–	40
avoine du printemps, orge, blé	urée	–	NR	10	–	–	30
	autre engrais — sable	–	NR	35	–	–	55
	autre engrais — argile	–	–	45	–	–	70
canola	sulfate d'ammonium — sable	–	–	22	–	–	11
	sulfate d'ammonium — argile	–	–	22	–	–	33
travail en pleine surface, en bandes latérales							
maïs	urée	200	–	–	250	–	–

100 kg/ha = 90 lb/acre

¹ À des doses plus élevées, les bandes doivent être au moins à 15 cm (6 po) de la semence. Pour les distances entre les rangs autres que 75 cm, rajuster la dose de manière à conserver la même concentration maximale dans le rang (par exemple, dans des rangs écartés de 50 cm [20 po], la dose sécuritaire est de $75/50 \times 52 = 78$ kg de N/ha [70 lb/acre]).

² Des quantités importantes d'azote inhibent la nodulation et ne sont pas recommandées.

³ L'urée avec la semence n'est pas recommandée pour le maïs, le soya ou le blé d'automne.

Recommandations de fertilisation et calcul des doses

La feuille de calcul C donne un exemple de feuille de calcul utilisée pour déterminer les doses d'engrais. (Consultez l'annexe C pour une feuille de calcul vierge à reproduire.)

Inscrire sur la ligne supérieure les besoins en N, P₂O₅ et K₂O. Déduire les éléments nutritifs fournis par les légumineuses, le fumier et d'autres sources organiques afin de préciser la quantité d'engrais minéraux nécessaire pour répondre aux besoins totaux.

Cette feuille de calcul se prête à des calculs en unités métriques ou en unités impériales.

Feuille de calcul C. Calcul relatif aux applications d'engrais

Culture prévue : maïs
 Culture précédente : orge avec trèfle des prés
 Fumier épandu (type, quantité) : fumier solide de bovins laitiers
 (10 t imp./acre), incorporé au printemps
 Autres sources organiques d'éléments nutritifs : aucune
 Engrais de démarrage (dose, formule) : (140 lb/acre) 8-32-16
 Azote supplémentaire (dose, formule) : aucun

Besoins	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Besoins — kg/ha (lb/acre) ¹	157 (140)	50 (45)	81 (72)
moins légumineuses	45 (40)	0	0
moins fumier	34 (30)	34 (30)	157 (140)
moins autres fertilisants organiques	0	0	0
Besoins totaux en engrais minéral	78 (70)	17 (15)	0
moins engrais de démarrage	12 (11)	49 (44)	25 (22)
moins engrais épandu en bandes latérales	0	0	0
Besoins totaux en engrais épandus en surface	66 (59)	0	0

¹ Besoins totaux de la culture. Vérifier si les légumineuses et les fumiers sont déjà pris en compte dans les recommandations.

Dans cet exemple, les besoins totaux en engrais épandu en pleine surface sont de 59 lb de N/ac ou de 128 lb d'urée/ac. On aurait aussi pu réduire la quantité d'engrais de démarrage. Si on a besoin d'un mélange plus complexe, on peut le calculer à l'aide de la feuille de calcul des mélanges d'engrais, p. 200.

Références

- Drury, C.F., X. Yang, W.D. Reynolds, W. Calder, T.O. Oloya, et A.L. Woodley. 2017. « Combining urease and nitrification inhibitors with incorporation reduces ammonia and nitrous oxide emissions and increases corn yields » dans *Journal of Environmental Quality*. 46:939-949.
- Garcia, M.C., J.A. Diez, A. Vallejo, L. Garcia et M.C. Cartagena. 1997. « Effect of applying soluble and coated phosphate fertilizers on phosphate availability in calcareous soils and on P absorption by a rye-grass crop » dans *J. Agric. Food Chem* 45(5) 1931–1936.
- Hall, William. 2005. « Benefits of enhanced-efficiency fertilizers for the environment » dans *IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers*, Frankfurt, Allemagne, du 28 au 30 juin 2005.
- Havlin, J.L, J.D. Beaton, S.L. Tisdale et W.L. Nelson. 2005. *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. 7^e éd. Upper Saddle River, New Jersey 07458: Pearson Education Inc.
- Hoefl, Robert G., Emerson D. Nafziger, Richard R. Johnson et Samuel R. Aldrich. 2000. *Modern Corn and Soybean Production*, Première édition. Savoy, IL 61874-0248: MCSP Publications. mcsp-pubs.com
- Stratus Ag Research. 2016. *Fertilizer Use Survey: 2016 Crop Year*. <http://fieldprint.ca/fertilizer-use-survey/>.
- UNIDO et IFDC. 1998. *Fertilizer Manual* (3^e édition). 615 pages. ISBN 0-7923-5032-4. Kluwer Academic Publishers. www.unido.org/resources/publications/publications-type/co-published.

Bibliographie

- California Plant Health Association. 2002. *Western Fertilizer Handbook*, 9^e éd. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.
- California Fertilizer Association. 1998. *Western Fertilizer Handbook*, 2^e éd. Horticulture Edition. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.
- Office des normes générales du Canada. Hull, Canada K1A 1G6. www.tpsgc-pwgsc.gc.ca/ongc-cgsb/index-fra.html
- Follet, R.H., L.S. Murphy et R.L. Donohue. 1981. *Fertilizers and Soil Amendments*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall.
- Follet, R.H. et coll. *Farm Chemicals Handbook*. Willoughby, Ohio: Meister Publishing Company.
- Frye, W. 2005. « Nitrification Inhibition for Nitrogen Efficiency and Environment Protection » dans *IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers*, Frankfurt, Allemagne, du 28 au 30 juin 2005.

Annexes

Annexe A. Feuille de calcul des mélanges d'engrais : exemple pour mélanges N-K ou P-K

- 1.** Dresser la liste des ingrédients disponibles et des formules.

Ingrédient	Formule

- 2.** Préciser les besoins en éléments nutritifs (ou le ratio ou la formule désirés) : _____

- 3.** Calculer la quantité de l'ingrédient nécessaire pour combler les besoins en chaque élément nutritif. Répéter pour chaque élément nutritif.

Besoin en élément nutritif ÷ proportion de l'élément = quantité de l'ingrédient

_____ ÷ _____ = _____
 _____ ÷ _____ = _____
 _____ ÷ _____ = _____

- 4.** Ajouter le poids des ingrédients et calculer les apports d'éléments nutritifs.

Matière	Poids	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Total				

Le poids total du mélange à ce point est la dose. Les unités seront les mêmes que pour les besoins initiaux en éléments nutritifs.

- 5.** Calculer la quantité totale d'engrais nécessaire.

Dose x taille du champ = poids total de l'engrais
 _____ x _____ = _____

- 6.** Rajuster le poids des ingrédients pour obtenir la formule en kilogrammes/tonne.
 Diviser le poids de chacun des ingrédients par le poids total et multiplier par 1 000.

Matière	Poids	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Total				
Formule (diviser par 10 les totaux N, P et K)				

Annexe B.
Feuille de calcul des mélanges d'engrais :
exemple pour mélanges N-P-K

- 1.** Dresser la liste des ingrédients disponibles et des formules

Ingrédient	Formule

- 2.** Préciser les besoins en éléments nutritifs (ou le ratio ou la formule désirés) _____

- 3.** Calculer la quantité de l'ingrédient (PDA ou PMA) nécessaire pour combler le besoin en N (ratios de P élevés) ou en P (ratios de N élevés)

Besoin en élément nutritif ÷ proportion de l'élément = quantité de l'ingrédient

$$\underline{\hspace{2cm}} \div \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\underline{\hspace{2cm}} \div \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

- 4.** Calculer la contribution de l'ingrédient aux autres éléments nutritifs

Ingrédient nécessaire x proportion de l'élément = apport

$$\underline{\hspace{2cm}} \times \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

- 5.** Déduire l'apport du besoin afin de déterminer le besoin résiduel de l'élément nutritif. (**Remarque :** si l'apport est supérieur au besoin, c'est que le calcul fait en premier visait le mauvais élément nutritif. Reprendre à l'étape 3.)

Besoin - apport = besoin résiduel

$$\underline{\hspace{2cm}} - \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

- 6.** Déterminer la quantité de l'ingrédient nécessaire pour répondre au besoin résiduel (source de N ou source de P)

Besoin résiduel de l'élément nutritif ÷ proportion de l'élément = quantité de l'ingrédient

$$\underline{\hspace{2cm}} \div \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

- 7.** Préciser la quantité de potasse nécessaire pour répondre au besoin en K

Besoin en K ÷ proportion de l'élément = quantité de l'ingrédient

$$\underline{\hspace{2cm}} \div \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

- 8.** Calculer de la même façon tous les ingrédients nécessaires pour chacun des autres oligo-éléments.

- 9.** Ajouter le poids des ingrédients et calculer les apports d'éléments nutritifs.

Matière	Poids	N	P₂O₅	K₂O
PMA				
urée				
potasse				
Total				

Le poids total du mélange à ce point est la dose. Les unités seront les mêmes que pour les besoins initiaux en éléments nutritifs.

- 10.** Calculer la quantité totale d'engrais nécessaire.

Dose x taille du champ = poids total de l'engrais

_____ x _____ = _____

- 11.** Rajuster le poids des ingrédients pour obtenir la formule en kilogrammes/tonne.

Diviser le poids de chacun des ingrédients par le poids total et multiplier par 1 000.

Matière	Poids	N	P₂O₅	K₂O
PMA				
urée				
potasse				
Total				
Formule (diviser par 10 les totaux N, P et K)				

Il est maintenant possible de calculer le prix de l'engrais.

Annexe C.
Feuille de calcul relative aux applications d'engrais

Culture prévue _____

Culture précédente _____

Fumier épandu (type, quantité) _____

Autres sources organiques d'éléments nutritifs _____

Engrais de démarrage (dose, formule) _____

Azote supplémentaire (dose, formule) _____

	N	P₂O₅	K₂O
Besoins — kg/ha (lb/acre)			
moins légumineuses			
moins fumier			
moins autres fertilisants organiques			
Besoins totaux en engrais minéral			
moins engrais de démarrage			
moins engrais épandu en bandes latérales			
Besoins totaux en engrais épandus en surface			

Annexe D. Conversions et équivalences

Du métrique à l'impérial

litres par hectare x 0,09	=	gallons par acre
litres par hectare x 0,36	=	pintes par acre
litres par hectare x 0,71	=	chopines par acre
millilitres par hectare x 0,015	=	onces liquides par acre
grammes par hectare x 0,015	=	onces par acre
kilogrammes par hectare x 0,89	=	livres par acre
tonnes par hectare x 0,45	=	tonnes impériales par acre

De l'impérial au métrique

gallons par acre x 11,23	=	litres par hectare (L/ha)
pintes par acre x 2,8	=	litres par hectare (L/ha)
chopines par acre x 1,4	=	litres par hectare (L/ha)
onces liquides par acre x 70	=	millilitres par hectare (mL/ha)
tonnes impériales par acre x 2,24	=	tonnes par hectare (t/ha)
livres par acre x 1,12	=	kilogrammes par hectare (kg/ha)
onces par acre x 70	=	grammes par hectare (g/ha)

Équivalents liquides

litres/hectare	gallons/acre
50	= 5
100	= 10
150	= 15
200	= 20
250	= 25
300	= 30

Équivalents poids secs

grammes/hectare onces/acre

100 = 1½

200 = 3

300 = 4½

500 = 7

700 = 10

kilogrammes/hectare livres/acre

1,1 = 1

1,5 = 1¼

2,0 = 1¾

2,5 = 2¼

3,25 = 3

4,0 = 3½

5,0 = 4½

6,0 = 5¼

7,5 = 6¾

9,0 = 8

11,0 = 10

13,0 = 11½

15,0 = 13½

De l'impérial au métrique (approximations)

Longueur

pouce = 2,54 cm

pied = 0,30 m

verge = 0,91 m

mille = 1,61 km

Surface

pied carré = 0,09 m²

verge carrée = 0,84 m²

acre = 0,40 ha

Volume (solides)

verge cube = 0,76 m³

boisseau = 36,37 L

Volume (liquides)

once liquide (imp.) = 28,41 mL

chopine (imp.) = 0,57 L

gallon (imp.) = 4,54 L

gallon (US) = 3,79 L

Pression

livre par pouce carré = 6,90 kPa

Poids

once = 28,35 g

livre = 453,6 g

tonne imp. = 0,91 tonne

Température

$$^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F} - 32) \times \frac{5}{9}$$

$$^{\circ}\text{F} = (^{\circ}\text{C} \times \frac{9}{5}) + 32$$

Du métrique à l'impérial (approximations)

Longueur

$$\text{millimètre (mm)} = 0,04 \text{ pouce}$$

$$\text{centimètre (cm)} = 0,40 \text{ pouce}$$

$$\text{mètre (m)} = 39,40 \text{ pouces}$$

$$\text{mètre (m)} = 3,28 \text{ pieds}$$

$$\text{mètre (m)} = 1,09 \text{ verge}$$

$$\text{kilomètre (km)} = 0,62 \text{ mille}$$

Surface

$$\text{centimètre carré (cm}^2\text{)} = 0,61 \text{ pouce cube}$$

$$\text{mètre carré (m}^2\text{)} = 10,77 \text{ pieds carrés}$$

$$\text{mètre carré (m}^2\text{)} = 1,20 \text{ verge carrée}$$

$$\text{kilomètre carré (km}^2\text{)} = 0,39 \text{ mille carré}$$

$$\text{hectare (ha)} = 107\,636 \text{ pieds carrés}$$

$$\text{hectare (ha)} = 2,5 \text{ acres}$$

Volume (liquides)

$$\text{millilitre (mL)} = 0,035 \text{ once liquide}$$

$$\text{litre (L)} = 1,76 \text{ chopine}$$

$$\text{litre (L)} = 0,88 \text{ pinte}$$

$$\text{litre (L)} = 0,22 \text{ gallon (imp.)}$$

$$\text{litre (L)} = 0,26 \text{ gallon (US)}$$

Volume (solides)

$$\text{centimètre cube (cm}^3\text{)} = 0,061 \text{ pouce cube}$$

$$\text{mètre cube (m}^3\text{)} = 1,31 \text{ pinte cube}$$

$$\text{mètre cube (m}^3\text{)} = 35,31 \text{ pieds cubes}$$

$$1\,000 \text{ mètres cubes (m}^3\text{)} = 0,81 \text{ acre-pied}$$

$$\text{hectolitre (hL)} = 2,8 \text{ boisseaux}$$

Poids

$$\text{gramme (g)} = 0,035 \text{ once}$$

$$\text{kilogramme (kg)} = 2,21 \text{ livres}$$

$$\text{tonne (t)} = 1,10 \text{ tonne courte}$$

$$\text{tonne (t)} = 2\,205 \text{ livres}$$

Vitesse

$$\text{mètre par seconde} = 3,28 \text{ pieds par seconde}$$

$$\text{mètre par seconde} = 2,24 \text{ milles par heure}$$

$$\text{mètre par heure} = 0,62 \text{ mille par heure}$$

Pression

$$\text{kilopascal (kPa)} = 0,15 \text{ livre/pouce carré}$$

Glossaire

Acide : Une solution avec un excès d'ions hydrogène (H^+). Cette solution aura un pH inférieur à 7.

Adsorber : Coller à la surface de quelque chose, par opposition à être absorbé dans quelque chose. Les ions des éléments nutritifs sont généralement adsorbés à la surface des particules argileuses.

Aérobic(s), conditions : Conditions caractérisées par la présence d'oxygène (air).

Agent d'extraction : Solution utilisée dans les analyses de fertilité du sol pour extraire les éléments nutritifs du sol en proportion de la quantité assimilable par les végétaux qui poussent dans ce sol. Aucun agent d'extraction unique n'est approprié pour tous les éléments nutritifs ou pour tous les types de sols.

Alcalin : Une solution avec un excès d'ions hydroxyle (H^-). Cette solution a un pH supérieur à 7.

Allélopathique : Se dit d'une culture qui, en se décomposant, dégage des composés qui nuisent à la croissance ou à la vigueur de la culture suivante.

Anaérobic(s), conditions : Conditions caractérisées par l'absence d'oxygène. Surviennent généralement dans les sols gorgés d'eau.

Analyseur automatique : Un appareil qui permet d'automatiser les tâches répétitives de l'analyse chimique. Dans la plupart des analyses de sol et de tissus végétaux, la concentration d'un élément est déterminée par l'intensité d'une couleur formée lorsqu'il est mélangé avec des composants précis.

Anion : Un ion à charge négative produit par la dissociation d'un acide ou d'un sel lorsqu'il est dissous dans l'eau (p. ex. $KCl \rightarrow K^+$, un cation, + Cl^- , un anion). Les anions communs dans le sol qui sont importants pour les cultures comprennent le nitrate (NO_3^-), le phosphate (PO_4^{3-}), le sulfate (SO_4^{2-}), et le chlorure (Cl^-).

Biosolides : Matières organiques de sources industrielles ou municipales qui peuvent se prêter à des épandages sur des terres agricoles. Cela comprend un éventail de matières, des boues d'épuration aux boues de papetières.

Calcaire : Sol qui contient du carbonate de calcium sous forme minérale. Ces sols ont un pH élevé et constituent un milieu très « tamponné », c.-à-d. qui oppose une grande résistance aux changements de pH.

Cation : Un ion à charge positive produit par la dissociation d'un acide ou d'un sel lorsqu'il est dissous dans l'eau (p. ex. $\text{KCl} \rightarrow \text{K}^+$, un cation, + Cl^- , un anion). Habituellement, les cations sont retenus dans le sol, étant attirés par les particules de sol et la matière organique chargées négativement sous l'effet de l'attraction électrostatique. Les cations d'importance pour les cultures qu'on trouve couramment dans le sol sont le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), le potassium (K^+), l'hydrogène (H^+), le fer (Fe^{2+} ou 3^+) et l'ammonium (NH_4^+).

Champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) : Champignons symbiotiques colonisant les racines de nombreuses cultures, contribuant ainsi à l'expansion du système racinaire et au prélèvement des éléments nutritifs, particulièrement du phosphore. Le terme vient du grec *myco*, qui signifie champignon, et de *rhiza*, qui signifie racine.

Chélate : Une molécule organique complexe qui peut entourer un ion métallique et s'y fixer à plusieurs endroits, gardant l'ion en solution et le protégeant de réactions qui pourraient le précipiter en composé insoluble. Les chélates sont utilisés comme supports pour certains oligo-éléments d'engrais et comme agents d'extraction pour déterminer la quantité d'oligo-éléments biodisponibles dans le sol.

Chélation : Le processus qui consiste à combiner un ion métallique avec un chélate.

Chlorose : Décoloration du tissu végétal causé par une perte de chlorophylle. Habituellement, les tissus jaunissent, mais leur couleur peut aller de vert pâle à presque blanc.

Coefficient : Nombre décrivant la relation entre deux autres nombres ou objets.

Colloïdes : Particules fines (moins de 0,002 mm de diamètre) d'argile ou de matière organique. Les colloïdes portent une charge négative et sont responsables de la plus grande partie de la capacité du sol à retenir les éléments nutritifs.

Complexe : Qualifie ce qui se combine avec un seul ion métallique à plusieurs endroits différents, comme dans le cas des chélates.

Composition garantie : Aussi appelée « garanties », elle devrait être décrite comme la composition minimale garantie, sauf pour le chlore (dans les engrais pour le tabac) où le pourcentage maximal doit être garanti. Les garanties s'expriment en termes d'éléments chimiques, sauf pour le phosphate assimilable (P_2O_5) et la potasse soluble (K_2O).

Corrélés : Liés l'un à l'autre. Ainsi une augmentation du rendement d'une culture pourrait être corrélée à la quantité d'engrais ajoutée.

Couche arable par acre : La quantité de couche arable contenue dans une surface d'un acre à une profondeur de 6 pouces. Le poids de ce volume de sol est d'environ 2 000 000 lb.

Dénitrification : La conversion des nitrates (NO_3^-) en azote gazeux (N_2) ou oxydes d'azote (NO_x) par des bactéries. Cela survient en présence de conditions de faible teneur en oxygène et peut entraîner une perte considérable d'azote assimilable vers l'atmosphère.

Densité apparente : Aussi appelée parfois densité relative apparente. Une mesure du poids d'une matière dans un volume donné. Dans le sol, la densité apparente est un indicateur du degré de compactage du sol. Dans les épandages d'engrais, la densité apparente est importante pour établir les doses d'épandage, puisque les épandeurs mesurent l'engrais par volume plutôt que par poids.

Densité relative apparente : Voir masse volumique apparente (ou densité apparente).

Désorber : Enlever un ion de la surface sur laquelle il était adsorbé. Cela se fait habituellement par l'ajout d'un excédent d'ions, qui désorbent les autres des surfaces argileuses.

DTPA (acide diéthylène triamine penta-acétique) : Chélate utilisé comme agent d'extraction dans le dosage du zinc et d'autres oligo-éléments pendant une analyse de sol, et comme support dans les engrais.

Échanges cationiques : Le mouvement continu des ions à charge positive (cations) entre la solution de sol et les surfaces d'argile minérale et de matière organique. Ce mouvement procure un équilibre entre les ions en solution et les ions adsorbés. L'ajout ou le prélèvement d'ions dans la solution perturbe cet équilibre, entraînant un échange d'ions jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre soit atteint.

Écoulement des macropores : Le mouvement rapide de l'eau à travers des voies préférentielles dans le sol, p. ex. des fissures et des canaux creusés par des vers de terre.

EDTA (acide éthylène diamine tétra-acétique) : Chélate utilisé comme agent d'extraction dans le dosage du zinc et d'autres oligo-éléments pendant une analyse de sol, et comme support dans les engrais.

Équation de Mitscherlich : Une forme d'équation utilisée pour décrire la réaction du rendement d'une culture à l'ajout d'engrais ou à l'analyse de sol. Elle n'atteint jamais une valeur maximale.

Équation quadratique : Une forme d'équation utilisée pour décrire la réaction du rendement d'une culture à l'ajout d'engrais. Elle atteint une valeur maximale et commence ensuite à baisser alors que la dose d'engrais augmente.

Équation quadratique à plateau : Une forme d'équation utilisée pour décrire la réaction du rendement d'une culture à l'ajout d'engrais. Elle est semblable à l'équation quadratique, mais demeure au même niveau lorsqu'elle atteint sa valeur maximale.

Équilibre : Plusieurs réactions chimiques peuvent se faire dans les deux sens, et il y a donc à la fin un mélange des réactifs initiaux et des produits finaux en équilibre. L'exemple le plus courant de ce type de réaction dans les sols est l'adsorption de cations sur des particules de sol à charge négative. Certains cations demeurent toujours en solution et sont en équilibre avec les cations retenus sur les particules du sol. Il y a mouvement constant des cations entre la solution et les particules du sol, mais les concentrations moyennes restent les mêmes.

Étalonnage : Processus visant à déterminer les doses d'épandage d'engrais les plus économiques pour un résultat d'analyse de sol donné avec une extraction du sol donnée.

État d'ameublissement : La structure et la friabilité du sol; la facilité de produire un lit de semence à partir du sol.

Fixation : 1. Réduction de l'azote atmosphérique, qui n'est pas assimilable par les plantes, en ammonium, sous l'effet de l'action microbienne. 2. Fixation du potassium entre les couches de certains minéraux argileux (vermiculite et smectite) le rendant non assimilable ou lentement assimilable par les plantes.

Formule : Concentrations d'azote total (N), de phosphate assimilable (P_2O_5) et de potasse soluble (K_2O) exprimées en pourcentage et dans cet ordre par des nombres unis par des traits d'union et disposés horizontalement, incluant le zéro le cas échéant. La formule de l'urée dosant 46 % d'azote est 46-0-0. Les nombres entiers compris dans la formule représentent les pourcentages minimaux garantis dans les matières et mélanges. La formule d'un mélange personnalisé (engrais de formule client) peut être exprimée en pourcentage précis à deux décimales près, p. ex. : 19,25-19,21-19,27.

Hygroscopique : Attraction et absorption d'eau de l'atmosphère. Nombre d'ingrédients d'engrais sont hygroscopiques et s'agglutinent en raison de l'humidité qu'ils absorbent s'ils sont exposés à l'air ambiant.

ICP : Spectromètre d'émission au plasma inductif.

Immobilisation : Indisponibilité temporaire ou permanente d'éléments nutritifs en raison de leur incorporation dans les tissus microbiens et la matière organique. L'immobilisation temporaire de l'azote peut se produire si l'on ajoute au sol des matières organiques à forte teneur en carbone.

Indice de phosphore : Un indicateur du risque d'enrichissement de l'eau de surface par le P provenant du ruissellement des terres agricoles. Il tient compte de la proximité de l'eau, de la gestion des terres et du potentiel d'érosion ainsi que de l'analyse du sol pour P et de la fertilisation pour évaluer le risque.

Indice de salinité : Indice de solubilité relative des divers ingrédients des engrais, selon la masse totale. Il n'y a pas de seuil critique, mais plus l'indice de salinité est élevé, plus le risque de dommage aux semences ou aux racines lorsque l'engrais est en contact avec ces parties de la plante est grand. L'indice est exprimé relativement au nitrate de sodium, auquel est attribuée une valeur de 100.

Ion : Un atome ou une molécule transportant une charge électrique, soit positive (cation), soit négative (anion). La plupart sont formés par la dissociation des acides ou des sels lorsqu'ils sont dissous dans l'eau (p. ex. $KCl \rightarrow K^+$, un cation, + Cl^- , un anion).

Labile : Tenu de façon lâche par les particules de sol et capable de se déplacer facilement dans la solution de sol.

Lessivage : Déplacement dans le sol des ions emportés par l'eau jusque dans les eaux souterraines. Le lessivage ne se produit que s'il y a un mouvement de descente net de l'eau (habituellement de la fin de l'automne au printemps) et des ions présents dans la solution de sol. Les nitrates, les sulfates et les chlorures sont les ions les plus vulnérables au lessivage.

M : Symbole de mole. Une mole est le nombre de molécules avec un poids en grammes équivalant à leur poids atomique. En d'autres termes, une mole d'hydrogène (masse atomique = 1) pèse un gramme. Une solution d'une mole (1 M) contient une mole de composé dissous dans un litre d'eau.

Minéralisation : Libération des éléments nutritifs par la matière organique au fur et à mesure de sa dégradation par l'activité microbienne.

Nervure médiane : Une nervure proéminente renforcée le long de la ligne médiane d'une feuille.

N-P-K : Représente la formule garantie. Dans les calculs de formule, l'usage commun consiste à utiliser le symbole du phosphore (P) pour parler du phosphate assimilable (P_2O_5) et le symbole du potassium (K) pour parler de la potasse soluble (K_2O).

Pétiole : Tige qui rattache la feuille immature au pseudo-tronc.

pH : Mesure de l'alcalinité ou de l'acidité d'une solution. L'échelle du pH va de 0 à 14. Un pH de 7 est dit neutre. Un pH inférieur à 7 est acide et un pH supérieur à 7, alcalin. Le pH de la plupart des sols se situe entre 5 et 8.

pH tampon : Une mesure de la quantité de chaux nécessaire pour neutraliser l'acidité d'un sol donné.

Phloème : Cellules creuses interreliées (tissu vasculaire) s'étendant des feuilles jusqu'aux racines et aux fruits à travers les tiges. L'eau et les éléments nutritifs dissous peuvent se déplacer dans les deux sens dans le phloème. C'est la voie de redistribution des glucides, des protéines et des éléments nutritifs mobiles dans la plante.

Phosphate assimilable : Dans un engrais, la somme de l'eau soluble et du phosphate soluble dans le citrate, exprimé comme de l'anhydride phosphorique (P_2O_5).

Potasse : Dans l'industrie des engrais, le mot potasse est utilisé pour parler soit du K_2O (oxyde de potassium), pour mesurer la teneur en potassium, pour renvoyer au KCl (chlorure de potassium) ou pour identifier l'engrais.

Potasse soluble : La portion de la potasse, exprimée comme oxyde de potassium (K_2O), qui est soluble dans l'oxalate d'ammonium aqueux, le citrate d'ammonium aqueux ou l'eau, conformément à une méthode internationale de l'AOAC applicable.

Sodique : Un sol où la plus grande partie du complexe d'échange cationique est occupée par le sodium. Ces sols sont caractérisés par un grand tassement et gonflement et par une très mauvaise stabilité structurale lorsqu'ils sont humides.

Spectrométrie d'absorption atomique :

Technique d'analyse permettant de décomposer un extrait en ses différents éléments dans une flamme, puis de déterminer la concentration de chacun de ces éléments en faisant traverser la flamme par un faisceau et en mesurant l'absorption par ces éléments de longueurs d'ondes spécifiques.

Sphérule : Petite granule d'urée ou de nitrate d'ammonium. Le nom est dérivé de la méthode de production de la granule.

Suspension : Mélange de matières solides finement moulues et d'eau, ou solution, que l'on agite pour garder la matière solide en suspension dans le liquide. On peut transporter de plus fortes concentrations d'engrais dans une suspension que dans une véritable solution.

Verse : Cultures qui penchent ou qui reposent à plat sur le sol en raison du bris des tiges ou de racines inadéquates. Les céréales peuvent verser en raison d'un excès d'azote.

Volatilisation : Perte de vapeur, habituellement d'ammoniac, dans l'air, par une matière solide épandue sur la surface du sol.

Xylème : Tubes creux s'étendant des racines jusqu'aux feuilles et aux organes de fructification d'une plante. L'eau et les éléments nutritifs dissous ne peuvent que remonter le xylème. La plupart des éléments nutritifs qui pénètrent dans les plantes se déplacent dans le xylème.

Index

A

absorption atomique 112
accroissement et maintien 158–166, 168
acidification 56, 69–70
agent d'extraction Bray 101
agent d'extraction du bicarbonate de sodium 101
agent d'extraction Olsen 100
aluminium 54
ammoniac. *Voir* ammonium
ammoniac anhydre 184–185
ammonium 18–22, 118, 205
analyses des tissus végétaux 113, 180
 échantillonnage 82–84
 manipulation des échantillons 113
analyses de sol
 accréditation 95–96
 agents d'extraction 92–94
 éléments nutritifs déclarés 89–90
 étalonnage 153
 manipulation des échantillons 89
analyse de sol critique 163–164
analyses du sol 96
 azote des nitrates 99–100
 magnésium 102–103
 oligo-éléments 103–104
 phosphore 100–102
 potassium 102–103
analyseur automatique 112
anthocyanine 30
aspects juridiques des engrais 202–203

azote 19–25
 carence 23
 fumier 127–128
 légumineuses 146
 lessivage 22
 minéralisation 19, 147
 organique 127
 prélèvement et répartition 24
 rôle dans les végétaux 22

B

besoins en chaux 62, 98
biosolides 66, 115, 118, 120–127, 130, 144
 contaminants 127
 teneur en éléments nutritifs 126
bore 45
 analyses 106
 carence 45
 toxicité 45
brûlure par l'engrais 203–205, 207

C

cadmium 50
calcium 34–35, 191, 192
 agents d'extraction 102
 carence 36
 rapport avec d'autres éléments nutritifs 35
 rôle dans les végétaux 35
calculs des formules 199
capacité d'échange cationique 7–8, 110–111, 171
 estimation 111
 mesure 111
cation 7
CEC. *Voir* capacité d'échange cationique

champignons mycorhiziens à arbuscules 14

chaulage
semis direct 67–68
temps nécessaire 68

chaux
épandage 67
incorporation 67-68
indice granulométrique 64
qualité 63

chaux agricole. *Voir* chaux

chaux calcitique 65

chaux dolomitique 65, 192

chaux granulaire 66

chaux liquide 65–66

CMA. *Voir* champignons mycorhiziens à arbuscules

chélates 104, 193

chlore 47

chlorure 47

chlorure de potassium 189

cobalt 49

compatibilité des engrais 197

composants du sol 2–5

compost 117–118, 121, 124–126, 128, 132, 135

concentrations critiques 179

concentrations déficientes 179

concentrations suffisantes 179

conductivité du sol 99

contrôle de la qualité 94–95

cuivre 46
analyses 106
carence 46

cultivar 83, 152

cultures de couverture 149
crédits de N 147
immobilisation de N 150

cycle de l'azote 20

D

dénitrification 21–22

densité de peuplement et espacement des plants 151–152

diagnostique 81, 84
échantillonnage 86–87
échantillonnage des tissus 84

diffusion 12, 15–16, 27

diphosphate d'ammonium 186, 188

dose sécuritaire maximale d'éléments nutritifs 212–213

DPA. *Voir* diphosphate d'ammonium

DRIS 181

DTPA 104–105, 193

E

eau, effet sur le rendement de l'engrais 151

échange de cations 8–9

échantillonnage des nitrates (sols) 75
manipulation des échantillons 75

échantillonnage des tissus 82–84
analyses 113
arbres fruitiers 82–83
moment 82–83
parties de la plante 82–83
vignes 82–83

échantillonnage du sol 73
composite 78
géoréférencé 78–79
grille 78–79
profondeur 73
semis direct 80–81
travail en bandes, engrais épandus en bandes 81

écoulement de masse 15–17

EDTA 104–105, 193

engrais à base de potassium 185–190

engrais azotés 183–185
amélioration de l'efficacité 194

engrais à libération contrôlée. *Voir* engrais à libération lente

engrais à libération lente 194

engrais épandu en bandes 81, 204–205, 207–208, 213

engrais épandu en bandes latérales 75, 174, 208, 214

engrais épandu en pleine surface 205, 206

engrais foliaire 209

engrais granulaires 183–189

engrais liquides 183, 190, 193, 208, 210

engrais phosphorés 187–189
amélioration de l'efficacité 195

engrais stabilisés 195

enlèvement des éléments nutritifs 174–178

épandeurs centrifuges 205–206

épandage d'engrais 203–211
épandage de l'engrais en contact avec la semence 208
épandage en bandes 207
épandage en bandes latérales 208
épandage en plein ou en pleine surface 205
feuille de calcul 212

épandage de l'engrais en contact avec la semence 208

épandage en bandes en profondeur 209

épandeurs pneumatiques 206

équations de gain de rendement 155–156

équation de Mitscherlich 155–156

équation quadratique 155–156

équation quadratique à plateau 154–156

étalonnage, analyse de sol 153

extrait d'acétate d'ammonium 102

extrait d'acide phosphorique 105

F

facteurs de conversion
phosphore en phosphate 132
potassium en potasse 132
pourcentage en unités de poids 132

fer 48, 106
analyses 106
carence 48

fertigation 211

fertilisation à dose variable 207

fixation 19–21
azote 19
phosphore 27–28
potassium 11

formule 183, 186–187

fumier 117–126
analyses 113
densité 138
échantillonnage 85–86
éléments nutritifs tirés 120–125
étalonnage de l'épandeur 138–139
moment de l'épandage 133–134
préoccupations environnementales 142–143
semis direct 141
traitement 122
transformations 118
variabilité 85

G

gain de rendement 151
à l'analyse de sol 156–157
à l'engrais épandu 154–155

gypse 68, 191–192

H

horizons du sol 1, 56

I

- ICP 113
- immobilisation (azote) 21
- indice agricole 66–67
- indice de salinité 186–187
- inhibiteurs de la nitrification 194–195
- inhibiteurs d'uréase 194
- interception racinaire 12

L

- légumineuses 146
 - azote assimilable 147
 - systèmes de culture 146

M

- macropores 26, 142
- magnésium 36–37, 65, 191–192
 - agents d'extraction 102
 - carence 37
 - rapport avec d'autres éléments nutritifs 36
 - rôle dans les végétaux 37
- maladies 151–152
- manganèse 44–45, 54–55
 - carence 44
 - indice de biodisponibilité 105
- matériel d'épandage 206
- matière organique 5, 10–11
 - analyses 106–107
- mauvaises herbes 152
- Mehlich III 94, 101–102, 103
- mélanges à la carte 196, 197
- mélanges d'engrais 196
 - feuille de calcul 200–202
 - ségrégation 198
- mercure 50
- méthode Walkley Black 107
- minéralisation 20–21, 128
- minéraux argileux 8–9, 11

- mise en place de l'engrais 203, 207–209
- mobilité des éléments nutritifs, végétaux 17
- molybdène 48
 - carence 49
- moment du repiquage 210
- monophosphate d'ammonium 188
- MPA. *Voir* monophosphate d'ammonium
- mycorhizes. *Voir* champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA)

N

- NAU. *Voir* solution de nitrate d'ammonium et d'urée
- nickel 49–50
- nitrate d'ammonium 184
- nitrate d'ammonium et de calcium 184
- nitrate de calcium 185
- nitrate de potassium 185
- nitrification 21
- numéro du système SGN 198

O

- objectif de rendement 169–170
- oligo-éléments 41–49
 - agents d'extraction 103–106
 - engrais 191–194
- oxyde nitreux 21–22, 195

P

- perte par calcination 107
- pH. *Voir* pH du sol
- pH du sol 53
 - échantillonnage, semis direct 80
 - mesure 97
 - pH élevé 58
 - symptômes 59–60
- pH tampon 60–62
- phloème 17

phosphate naturel 188–189

phosphore 25–30
analyses 100–102
biodisponibilité 27–29
carence 30
dissous 26
effet du pH du sol 27
fumier 129–130
mise en place 28
particulaire 26
rapport avec d'autres éléments nutritifs 29
rôle dans les végétaux 29

phytase 119

planification de la gestion des éléments nutritifs 139

plomb 50

pluie acide 39

poils absorbants 13, 16

polyphosphate d'ammonium 188

pondération en fonction d'une fertilisation suffisante 153, 158–160

potassium 31–33
analyses 102–103
biodisponibilité 31–32
carence 33–34
fourrages 32
fumier 130
rapport avec d'autres éléments nutritifs 32
rôle dans les végétaux 33

pourcentages et ratios de saturation en bases 170–171

pourriture apicale 35

prélèvement des éléments nutritifs 174–178

prélèvement excessif 32, 130

R

ratio azote:soufre 40

ratio C:N. *Voir* ratio carbone:azote

ratio carbone:azote 24, 129

ratio carbone:soufre 40

réduction du pH du sol 69

réserve d'acidité 97

rotation des cultures 146, 151–152

S

saturation en bases 110, 111
pourcentage 170
ratios 170

ségrégation 198

sélénium 50

sels solubles 98

semis direct 80, 141

silicone 50

sodium 49

solution de nitrate d'ammonium et d'urée 184

solution tampon (SMP) 95, 97

soufre 38–42
analyses 103
carence 41
dépôt 38–39
rôle dans les végétaux 40

sulfate d'ammonium 185–186, 191, 213

sulfate de potassium 189

sulfate de potassium-magnésium 189

superphosphate 187

superphosphate simple 187

superphosphate triple 187

suspensions d'engrais 191

symptômes de carence. *Voir* éléments nutritifs individuels

systèmes de production biologique 196

système tru-spread 206

T

tailles des particules 64, 108

tétanie d'herbage 37, 171

texture du sol 3, 108–109

travail du sol 58, 67-68, 77, 152

U

urée 183

V

valeur neutralisante 63–64

variabilité du sol 76

volatilisation 128, 133

X

xylème 17

Z

zinc 43–44

indice de biodisponibilité 105

carence 43

Avez-vous besoin d'information technique ou commerciale?

Communiquez avec le Centre d'information agricole :

1 877 424-1300

ou ag.info.omafra@ontario.ca

Cherchez-vous sur Internet de l'information sur les grandes cultures?

ontario.ca/cultures

Un guichet unique pour obtenir des fiches techniques, des articles et des photos sur la production et l'entretien des grandes cultures.

Commandes

Pour la liste complète des publications, voir le site Web du MAAARO à ontario.ca/maaaro. On peut commander les publications en s'adressant à ServiceOntario :

- en ligne, à www.publications.serviceontario.ca
- par téléphone, en appelant InfoCentre ServiceOntario, du lundi au vendredi de 8 h 30 à 17 h aux numéros suivants :
416 326-5300,
416 325-3408 (ATS),
1 800 668-9938, sans frais, de tout le Canada,
1 800 268-7095, ATS, sans frais, de tout l'Ontario.

Publié par le ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales
© Imprimeur de la Reine pour l'Ontario, 2018

ISBN 978-1-4868-2403-8 (version imprimée)

ISBN 978-1-4868-2404-5 (version PDF)

10-18-0,05M

Also available in English.

Carences en éléments nutritifs

Carence en azote

- Jaunissement de la pointe de la feuille le long de la nervure médiane
- L'azote est mobile dans les végétaux et les symptômes apparaissent donc d'abord sur les feuilles les plus basses
- Indique les pertes d'azote, la fixation ou une fertilisation insuffisante

Consultez la page 23.



Maïs, comté de Bruce

Carence en potassium

- Les symptômes apparaissent sur les vieilles feuilles inférieures : jaunissement ou taches blanches (luzerne) le long des bordures des feuilles
- Due à un faible résultat d'analyse du sol ou une mauvaise croissance des racines (maladie, compactage, mauvais drainage, etc.)

Consultez la page 33.



Luzerne, comté de Bruce



Soya, comté de Wellington

Carence en soufre

- Une carence en soufre est présente dans le côté droit de la photo
- Une chlorose ou un jaunissement survient sur les plus jeunes feuilles en premier en raison du manque de mobilité du soufre dans les végétaux

Consultez la page 41.



Blé d'automne, région de Niagara

Réponse au phosphore



Blé d'automne, comté de Kent

Source : D' Dave Hooker, Université de Guelph, Ridgeway

- Teneur phosphore : 7 ppm (Olsen)
- Photo: 13 avril 2016 (blé semé le 5 octobre 2015)
- 42 kg/ha P_2O_5 épandu dans la raie (D), aucun P épandu (G)
- Rendement : 112 boisseaux/acre (avec P) c. 86 boisseaux/acre (sans P)

Consultez la page 30.

Carence interne en calcium (Pourriture apicale)

- Faible mobilité dans les tissus végétaux
- Carence causée par une carence d'humidité ou un besoin de transpiration élevé durant la nouaison — généralement un manque de calcium dans le sol ou dans les racines



Consultez la page 35.



Poivrons et tomates, comté de Kent

Carence en bore

- Les symptômes de carence comprennent le raccourcissement des nœuds, la décoloration des feuilles, une mauvaise floraison et une mauvaise nouaison
- Plus fréquente dans des sols à texture légère dans des conditions de sécheresse

Consultez la page 45.



Luzerne, comté de Kent

Carence en manganèse

- Le manganèse a une faible mobilité dans le sol et dans les tissus végétaux
- Les symptômes de carence peuvent comprendre le rabougrissement et la chlorose internervaire
- Plus communément vue dans des sols à pH élevé, les terres noires et les sols érodés

Consultez la page 44.



Pois de transformation, comté de Kent



Soya, comté de Kent

Source : Dale Cowan CCA-ON

