

PRINCIPES

DANS CE CHAPITRE, NOUS ÉTUDIERONS :

les éléments nutritifs requis par les cultures

les sources d'éléments nutritifs

les cycles de l'eau et des éléments nutritifs

le devenir des éléments nutritifs dans les systèmes de production agricole

les agents pathogènes et les sources d'éléments nutritifs

l'indice-N et l'indice-P

l'approche systématique

De nombreux facteurs peuvent réduire la capacité d'une culture à tirer du sol les éléments nutritifs. Pour élaborer un plan de gestion des éléments nutritifs qui soit efficace, il faut connaître ces facteurs, leurs interactions réciproques et les effets qu'ils ont sur les options dont dispose l'agriculteur.

PRINCIPAUX ÉLÉMENTS PRODUITS PAR LES EXPLOITATIONS AGRICOLES

En agriculture, la plupart des systèmes de production — autant de bétail que de cultures — dépendent d'une abondance d'éléments nutritifs disponibles. Les **macro-éléments fertilisants (azote, phosphore, potassium)** et les **éléments secondaires (calcium, magnésium et soufre)** sont considérés comme indispensables à la vie animale et végétale. Le rôle biologique principal de chacun est indiqué dans le tableau suivant.



Une carence en phosphore dans le maïs se traduit par la coloration rouge violacé des feuilles.

RÔLE DES MACRO-ÉLÉMENTS ET DES ÉLÉMENTS SECONDAIRES

ÉLÉMENT NUTRITIF	RÔLE CHEZ LE BÉTAIL	RÔLE CHEZ LES PLANTES
AZOTE (N)	<ul style="list-style-type: none"> • composition des protéines dans les muscles, la peau et les organes internes • constitution d'enzymes impliqués dans les processus métaboliques 	<ul style="list-style-type: none"> • composition des protéines responsables de la croissance des tissus • constitution d'enzymes impliqués dans les processus biologiques • photosynthèse et respiration
PHOSPHORE (P)	<ul style="list-style-type: none"> • croissance des os • transfert de l'énergie • production de lait, de viande et d'œufs 	<ul style="list-style-type: none"> • photosynthèse et respiration • transfert de l'énergie • division cellulaire
POTASSIUM (K)	<ul style="list-style-type: none"> • activité musculaire • régulation de la pression sanguine • tamponnage du pH 	<ul style="list-style-type: none"> • formation de la structure des végétaux • photosynthèse et respiration • absorption de l'eau par les racines
CALCIUM (Ca)	<ul style="list-style-type: none"> • croissance et réparation des os • production de lait et d'œufs • fonctions reproductrices 	<ul style="list-style-type: none"> • renforcement des parois cellulaires • formation des cellules • activation des enzymes
MAGNÉSIUM (Mg)	<ul style="list-style-type: none"> • composition d'enzymes • relaxation des muscles 	<ul style="list-style-type: none"> • photosynthèse • activation des protéines et des enzymes
SOUFRE (S)	<ul style="list-style-type: none"> • composition de nombreux acides aminés des protéines et des enzymes 	<ul style="list-style-type: none"> • composition de nombreux acides aminés des protéines et des enzymes

SOURCES D'ÉLÉMENTS NUTRITIFS

La plupart des éléments nutritifs assimilés par les plantes proviennent du sol même. Cependant, il faut savoir que la teneur de certains éléments nutritifs dans le sol peut être insuffisante pour maintenir la croissance optimale.

Les matières nutritives qu'on peut ajouter au sol se présentent sous deux formes principales :

- **inorganique**, p. ex. les engrais commerciaux,
- **organique**, p. ex. la majeure partie des fumiers, des résidus de cultures et des biosolides.

Les sources de matières organiques comprennent :

- le fumier provenant de l'exploitation même ou d'autres fermes;
- les engrais verts comme les légumineuses;
- les applications antérieures de fumier ou de biosolides apportant de l'azote résiduel;
- les eaux de lavage et les sous-produits des traitements du fumier;
- les biosolides et autres matières de source non agricole.

Au fur et à mesure qu'on élabore le plan de gestion des éléments nutritifs, on cherche à utiliser les éléments qui sont le plus facilement disponibles sur la ferme.



Une bonne façon d'inventorier les éléments nutritifs disponibles pour les cultures sur la ferme est de commencer par quantifier ceux qui s'y trouvent déjà, tels que le fumier et les cultures d'engrais vert.

Les matières de source non agricole, comme les engrais commerciaux et les biosolides, servent à combler les lacunes laissées par les éléments nutritifs provenant du fumier produit sur la ferme.

Utilisés en quantités précises, les engrais commerciaux sont une source uniforme, équilibrée et fiable d'éléments nutritifs. À titre d'exemple, mentionnons les engrais de démarrage et l'azote commercial épandu en bandes dans le maïs.

ENGRAIS COMMERCIAUX

Les engrais commerciaux constituent l'une des principales sources d'éléments nutritifs pour les cultures. Leur utilisation comporte du pour et du contre.

ENGRAIS COMMERCIAUX

AVANTAGES

- sont composés d'éléments nutritifs en concentrations connues et constantes, ce qui permet des applications précises, au bon moment
- sont facilement disponibles
- peuvent être mélangés pour répondre exactement aux besoins d'une culture

INCONVÉNIENTS

- proviennent de l'extérieur de la ferme
- n'apportent aucune matière organique au sol
- peuvent perdre de l'azote hors de la saison de croissance
- exigent beaucoup d'énergie pour être fabriqués

Fabrication des engrais commerciaux

L'**azote** est transformé en ammoniac (NH_3) à partir de l'azote gazeux extrait de l'atmosphère et de l'hydrogène tiré du gaz naturel. Le produit de départ est l'ammoniac anhydre (82 % de N). Tous les autres composés de l'azote sont ensuite fabriqués à partir de l'ammoniac. Les composés les plus courants sont l'urée (46 % de N) et les solutions d'urée et de nitrate d'ammonium (28 % de N).

Les engrais **phosphatés** les plus courants sont produits par traitement du phosphate naturel — une forme de phosphore non disponible pour les plantes qu'on trouve dans le roc — avec différents acides afin de le rendre biodisponible. On peut ajouter de l'azote pendant la transformation du phosphore pour faire des mélanges azote-phosphore et augmenter encore davantage la disponibilité du phosphore.

Les engrais **potassiques** sont fabriqués par broyage du chlorure de potassium (anciennement appelé muriate de potasse) et par lavage du produit résultant pour en enlever les autres sels.

Contrairement aux sources organiques d'éléments nutritifs, les engrais commerciaux peuvent être mélangés en vue de répondre aux besoins précis des cultures.

Les engrais commerciaux se prêtent à une application précise, au moment où les cultures en ont besoin.



FUMIER

Le fumier apporte aux cultures les mêmes éléments nutritifs que les engrais commerciaux. Toutefois, dans le cas des fumiers, il est impossible de modifier les proportions des différents éléments nutritifs pour satisfaire les besoins d'une culture en particulier comme on peut le faire avec les engrais commerciaux. On doit les utiliser tels quels. Certains fumiers, comme le fumier solide (ou complet) de volaille, sont plus « concentrés » en comparaison du fumier liquide de veaux, lequel est très dilué.

Certains types de fumier liquide sont faciles à manipuler, peu importe le matériel d'épandage. Par contre, leur dilution coûte cher en terme de quantité d'éléments nutritifs épandus sur une surface donnée.



FUMIER

AVANTAGES

- contient de nombreux éléments nutritifs requis
- libère les éléments nutritifs sur plusieurs années après l'application
- apporte de la matière organique au sol

INCONVÉNIENTS

- a une teneur en éléments nutritifs variable
- ne répond pas toujours aux besoins des cultures
- produit des odeurs
- peut causer la contamination des eaux s'il n'est pas bien géré
- peut être difficile à épandre sur des cultures en croissance



Le ruissellement non contrôlé à partir de fumier mal entreposé ou mal épandu peut contaminer des eaux de surface avec des éléments nutritifs, des bactéries et des débris organiques.



Des structures de lutte contre l'érosion, telles que les bassins de sédimentation et de contrôle des eaux, contribuent à réduire la quantité des eaux de ruissellement sur les terres cultivables et leur charge de sédiments.

Dans le fumier, l'**azote** se présente sous forme organique et inorganique (ammonium). La proportion de chaque forme varie selon le type de fumier ainsi que le genre de litière et sa quantité.

À la longue, l'azote organique du fumier se transforme en ammonium par l'action microbienne, et ensuite en **nitrate**. Au bout du compte, tout l'azote peut être absorbé par les plantes sous forme soit d'ammonium soit de nitrate.

Le **phosphore** se présente sous forme organique et inorganique dans la fraction solide du fumier. L'application répétée de fumier fait augmenter le niveau de P (phosphore). Dans les sols pauvres en phosphore, seulement 40 % du P est disponible comme engrais phosphaté l'année de l'application. Le restant devient disponible avec le temps. Dans les sols plus riches en P, tout le phosphore du fumier est biodisponible dès l'application. Au fur et à mesure que la teneur en P s'élève, les risques de pollution des eaux de surface augmentent parallèlement. Par ailleurs, des teneurs assez élevées en phosphore nuisent à la santé des plantes.

La teneur du fumier en éléments nutritifs est fonction de nombreux facteurs, dont :

- la nutrition — en général, les meilleures conversions alimentaires entraînent moins de rejets d'azote et de minéraux dans le fumier;
- les additifs alimentaires — ceux qui favorisent la croissance peuvent réduire les rejets de N et de P dans le fumier;
- la dilution — le type d'installation de stockage et le volume des eaux qui y sont recueillies influent sur la concentration des éléments nutritifs dans le fumier;
- la litière (genre et quantité) — les litières, comme les copeaux de bois, qui ne se décomposent pas facilement sont susceptibles de lier certains éléments nutritifs du fumier (p. ex. l'azote), les rendant temporairement non disponibles pour les cultures.

BIOSOLIDES OU MATIÈRES DE SOURCE NON AGRICOLE (MSNA)

Les biosolides, aussi appelés matières sèches biologiques, sont issus du traitement des eaux d'égout, des boues de papeteries et d'autres sources. Ils fournissent aux cultures un bon nombre des éléments nutritifs qu'apportent les fumiers et les engrais commerciaux.

Il faut obtenir auprès du ministère de l'Environnement un Certificat d'approbation avant toute application de biosolides. Les épandages doivent s'effectuer en conformité avec les lignes directrices provinciales.



Les biosolides fournissent un bon nombre des éléments nutritifs qu'apportent les fumiers et les engrais commerciaux.

SURVIE DES ORGANISMES PATHOGÈNES

Le fumier abrite des bactéries, des virus et des parasites. La diversité et le nombre de ces micro-organismes font du fumier un amendement de sol utile. Toutefois, certains d'entre eux sont dits « pathogènes » parce qu'ils peuvent infecter le bétail et les humains.

Un organisme pathogène est tout virus, toute bactérie ou tout protozoaire susceptible d'entraîner l'infection ou la maladie chez les animaux supérieurs ou les humains. On compte parmi les agents pathogènes des parasites, tels que les vers ronds et certaines bactéries (p. ex. *Salmonella* et *E. coli*), ainsi que des protozoaires, comme *Cryptosporidium parvum* et *Giardia*. La plupart des virus qui s'attaquent au bétail ne sont pas transmis à l'espèce humaine.

Rares sont les organismes pathogènes qui survivent à l'écart du bétail hôte. La plupart meurent en quelques jours, mais certains restent vivants jusqu'à plusieurs mois, selon les conditions environnementales. Les conditions suivantes peuvent faire obstacle à leur survie :

- hautes températures — les très hautes températures atteintes pendant le compostage;
- gel ou alternance gel-dégel — des températures modérées pourraient prolonger leur survie;
- bas niveau d'humidité, ensoleillement, sécheresse dans le champ;
- décomposition du fumier — elle produit des substances chimiques qui tuent certains organismes pathogènes qui affectent les cultures;
- pH bas ou élevé — l'acidité du sol et l'épandage de chaux réduisent leur survie;
- absence d'oxygène — les fumiers liquides, ainsi que les parties les plus humides du fumier solide stocké sont considérés comme des environnements anaérobies (sans oxygène).

Le sol est un milieu très efficace pour piéger les bactéries et d'autres organismes. Il agit comme un filtre pour stopper la majorité des protozoaires et des bactéries. Les sols riches en matière organique et en argile stoppent plus efficacement les virus que les autres sols. En revanche, les organismes pathogènes peuvent contourner les « filtres » du sol, entraînés par l'eau au travers des macropores ou par l'écoulement préférentiel jusqu'aux aquifères peu profonds, ou même en empruntant le réseau de drainage.

Les organismes pathogènes peuvent atteindre les eaux de surface par l'intermédiaire des eaux de ruissellement ou grâce au bétail ayant accès à des ruisseaux ou à d'autres cours d'eau. Les éleveurs dont les exploitations sont situées en amont de sources municipales d'eau potable ou d'aires récréatives doivent être conscients des dangers potentiels que posent leur emplacement et élaborer des PGEN en conséquence. Il est peu probable que des organismes pathogènes contaminent directement des eaux souterraines.

Les bactéries pathogènes qu'on trouve chez le bétail peuvent infecter les humains si elles gagnent directement des sources d'eau potable ou récréatives. Dans les eaux de puits, on peut éliminer ces bactéries avec du chlore ou au moyen de systèmes de filtration à l'ultraviolet.



Les procédés de traitement du fumier, comme la digestion anaérobie et le compostage, peuvent créer un milieu propice à la réduction des populations d'organismes pathogènes dans le fumier.

NUTRITION DU BÉTAIL ET REJETS D'ÉLÉMENTS NUTRITIFS

Les aliments et stratégies alimentaires influent sur la santé du bétail et de la volaille, leur performance et la qualité de leurs produits. On réduira le gaspillage et on améliorera les performances en adoptant les grands principes de nutrition animale, d'analyse des aliments et de formulation des rations.

Il existe des stratégies nutritionnelles scientifiquement éprouvées qui permettent d'améliorer l'équilibre des éléments nutritifs sur les fermes d'élevage. Ces stratégies, plutôt faciles à mettre en œuvre, pourraient avoir des répercussions appréciables sur les rejets d'éléments nutritifs et la rentabilité de l'exploitation. La stratégie la plus pratique et la plus prometteuse met l'accent sur deux principes fondamentaux : optimiser les intrants et viser l'utilisation la plus efficace possible.

En alignant l'alimentation sur les besoins des animaux, on réduit du même coup les rejets d'éléments nutritifs dans le fumier, et ce chez tous les types de bétail. Chez les **ruminants** par exemple, l'équilibre des compléments minéraux contenant du phosphore réduit les rejets de P. D'un autre côté, l'équilibre des protéines digestibles et non digestibles dans le rumen entraîne la baisse des rejets de N. Chez les **non-ruminants**, on obtient les meilleurs résultats en utilisant la phytase, en diminuant la quantité de compléments minéraux contenant du P, ou en équilibrant les acides aminés — on a parfois recours à des acides aminés synthétiques — afin d'améliorer au maximum l'efficacité protéique. En adoptant de telles stratégies, il est possible de réduire de moitié les rejets de N et de P (voir le tableau ci-dessous).

La mise en œuvre de stratégies nutritionnelles pour réduire les rejets d'éléments nutritifs demande qu'on améliore l'évaluation des ingrédients alimentaires, la formulation des aliments, leur fabrication et leur livraison. En minimisant le gaspillage de l'eau d'abreuvement, on diminuera le volume de fumier. En outre, toute mesure visant à hausser les performances animales et à réduire le gaspillage d'aliments contribuera à abaisser les rejets.



La phytase peut diminuer de moitié les rejets de P dans le fumier de porcs.

PORCS : EFFETS POSSIBLES DE STRATÉGIES NUTRITIONNELLES SUR LES REJETS AZOTÉS ET PHOSPHORÉS

STRATÉGIE MISE EN ŒUVRE	RÉDUCTION POTENTIELLE DES REJETS
Amélioration de la conversion alimentaire	3 % par tranche de 0,1 unité d'amélioration
Réduction au minimum du gaspillage des aliments	1,5 % pour chaque élément nutritif par tranche de 1 %
Satisfaction des besoins alimentaires	6–15 % pour N et P
Alimentation par étape	5–10 % pour N et P
Alimentation selon le sexe	5–8 % pour N
Phytase	2–5 % pour N; 20–50 % pour P
Formulation selon la disponibilité	10 % pour N et P
Équilibrage des acides aminés	9 % pour N par tranche de réduction de la P.B. de 1 %
Haute digestibilité des ingrédients alimentaires	5 % pour N et P
Agglomération des aliments	5 % pour N et P
Production de particules de 700–1000 microns	5 % pour N et P
Utilisation d'enzymes : cellulases, xylanases, etc.	5 % pour N et P selon un régime approprié
Recours à des additifs favorisant la croissance	5 % pour tous les éléments nutritifs
Alimentation de maïs pauvre en phytase	25–50 % pour P

Nota : La réduction réelle des rejets de N et de P peut varier. Plus le programme alimentaire d'origine se rapproche des recommandations, moins grande sera la réduction des rejets dans le fumier.

CYCLES DE L'EAU ET DES ÉLÉMENTS NUTRITIFS

CYCLE DES ÉLÉMENTS NUTRITIFS

Les éléments nutritifs parcourent des cycles réguliers dans le sol en prenant différentes formes. Pendant leur parcours, ils sont utilisés par les végétaux, rejetés dans le sol ou convertis en formes non biodisponibles.

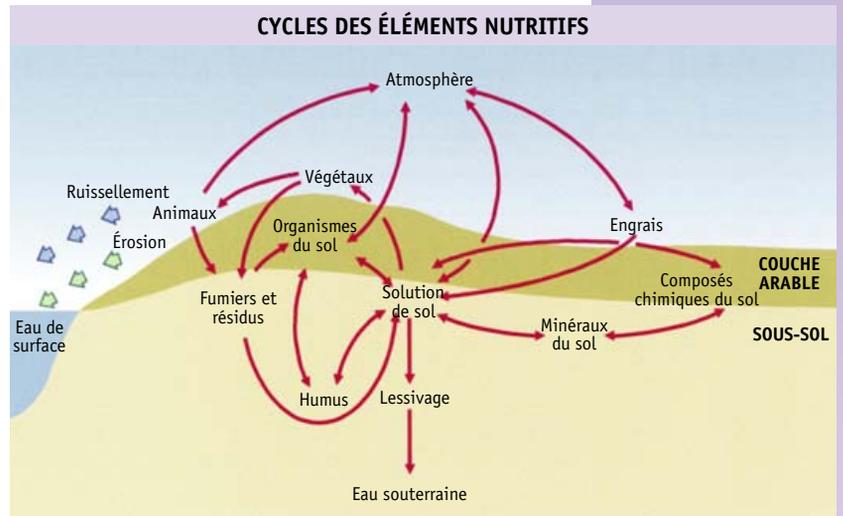
Tout plan de gestion des éléments nutritifs sérieux repose sur une compréhension générale des cycles des éléments nutritifs et de leurs interactions avec le cycle de l'eau. Il faut donc connaître les différentes formes que prennent les éléments nutritifs, les facteurs qui modifient leur disponibilité et ceux qui les font sortir du cycle.

Les éléments nutritifs se trouvent donc dans le sol sous bien des formes différentes, dont seulement certaines sont utiles pour les plantes. Peu importe qu'on les épande sous forme organique (p. ex. fumier) ou inorganique (p. ex. engrais commerciaux), seules les formes organiques sont biodisponibles (disponibles pour les plantes).

Dans un sol non gelé, des processus chimiques et biologiques convertissent sans arrêt les éléments nutritifs d'une forme à une autre, tout en respectant un vague équilibre entre elles. Consulter le schéma de droite pour avoir une idée générale de ces cycles.

Sol

- Certains éléments nutritifs proviennent de la désintégration des minéraux dans les terres cultivées.
- On peut augmenter directement la quantité d'éléments nutritifs dans le sol par l'épandage d'engrais, de fumier et d'autres matières organiques.
- La quantité d'éléments nutritifs dans le sol augmente indirectement du fait de la décomposition de la matière organique, des animaux et micro-organismes terricoles, des fumiers et des résidus de cultures.
- Les micro-organismes du sol décomposent la matière organique, le fumier et les résidus de cultures afin de s'en nourrir ou de les convertir en des formes solubles; d'autres micro-organismes changent les éléments nutritifs en gaz qui s'échappent ensuite dans l'atmosphère.
- En solution dans le sol, les éléments nutritifs peuvent être assimilés par les cultures ou les micro-organismes, échangés contre d'autres éléments nutritifs sur des sites d'échanges spécifiques, liés à des minéraux (donc non disponibles) ou lessivés vers les eaux souterraines.



Les éléments nutritifs existent dans le sol sous des formes multiples et interchangeables. Ces dernières sont le résultat de processus chimiques et biologiques. Les cycles empruntés par les différents éléments nutritifs se déroulent dans le sol, les cultures, le bétail, le fumier, d'autres matières nutritives, les eaux de surface et souterraines et, pour ce qui est de l'azote et du soufre, dans l'atmosphère.

Cultures

- Les cultures puisent des éléments nutritifs dans la solution du sol — au moment de la récolte, ces éléments sont retirés temporairement du sol et servis au bétail comme aliments ou retournés à la terre comme résidus de culture.

Bétail

- Le bétail consomme les cultures comme fourrages pendant leur broutage ou comme aliments complets; ils les utilisent pour leur entretien, la production ou la reproduction, et remettent au sol directement ou indirectement une part de ces éléments nutritifs par le fumier.

Fumier et autres matières nutritives

- Quand les matières sont enfouies :
 - ▷ les portions organiques sont modifiées ou liées par les micro-organismes du sol;
 - ▷ les portions inorganiques passent directement dans la solution de sol.
- Quand les matières restent en surface :
 - ▷ certains éléments nutritifs s'échappent directement dans l'atmosphère;
 - ▷ d'autres peuvent rejoindre les eaux de ruissellement;
 - ▷ les éléments nutritifs restants connaissent le même sort que les matières enfouies.

Eau

- Le ruissellement sur les terres cultivées peut dérober à la couche arable certains éléments nutritifs et les déposer au bas des pentes ou dans les eaux de surface.
- Certains éléments nutritifs quittent la solution de sol et le système des terres cultivables à la faveur du lessivage et rejoignent le réseau de drainage ou les eaux souterraines.

Atmosphère

- Les cultures et les micro-organismes du sol sont aptes à fixer des gaz atmosphériques, tels que l'azote et le méthane.
- Des éléments nutritifs présents dans la solution du sol passent à l'état gazeux dans l'atmosphère — certains d'entre eux, comme l'oxyde de diazote, le méthane et le dioxyde de carbone, sont des gaz à effet de serre nocifs.

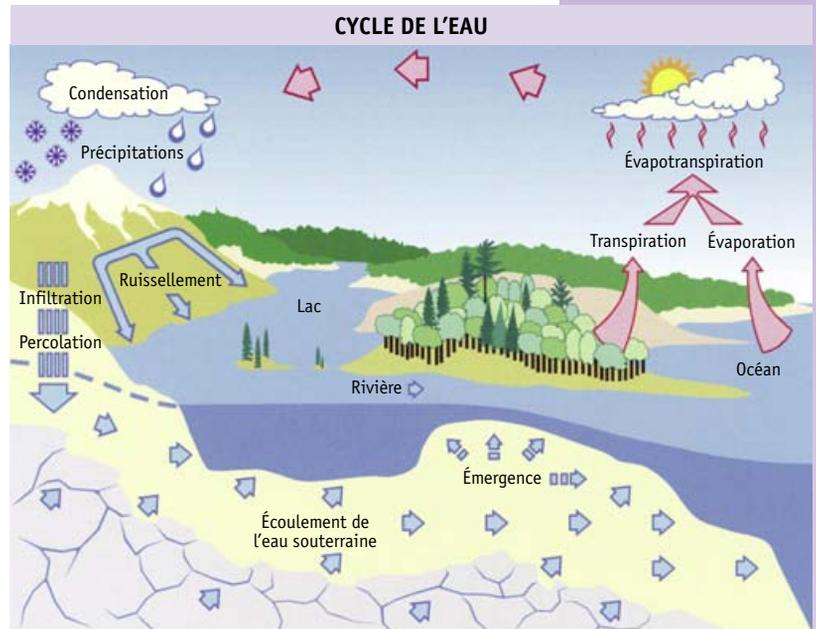
CYCLE DE L'EAU

L'eau est constamment en mouvement, étant recyclée dans l'environnement selon une série de voies composant le **cycle de l'eau**.

Les précipitations, qui prennent surtout la forme de pluie ou de neige, tombent sur les terres, les bâtiments et les plans d'eau. Elles peuvent être stockées, pour un temps, dans les lacs, rivières et étangs, être retenues par la neige au sol ou la végétation, ou être conservées sous forme de glace et de neige.

Une part de l'eau qui tombe sur les terres et les bâtiments ruisselle à la surface du sol vers des plans d'eau (p. ex. lacs et rivières). En outre, une part de l'eau retenue dans le sol et la végétation s'infiltrate à travers les strates de sol pour gagner les eaux souterraines. Ces eaux souterraines peuvent ensuite rejoindre les lacs, rivières, étangs, terres humides et puits ou même monter à la surface du sol. L'eau souterraine qui coule à la surface du sol et les petits plans d'eau forment un système plus étendu qu'on appelle bassin versant ou hydrographique.

À la surface du sol, l'eau peut s'évaporer directement dans l'atmosphère ou s'échapper des plantes en croissance active par évapotranspiration — phénomène par lequel la végétation libère de l'humidité dans l'air.



L'eau est constamment en mouvement, étant recyclée dans l'environnement selon une série de voies composant le cycle de l'eau.

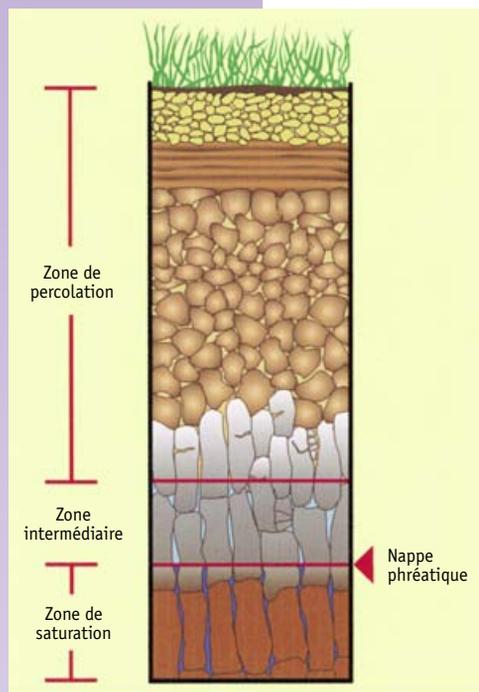
INTERACTIONS ENTRE LE CYCLE DE L'EAU ET LE CYCLE DES ÉLÉMENTS NUTRITIFS

Voies empruntées par l'eau

Dans le champ, les **précipitations** peuvent :

- être stockées en surface dans la neige ou la glace,
- s'évaporer à la surface du sol,
- s'infiltrer dans le sol,
- être gardées dans le sol en vue d'alimenter les cultures,
- ruisseler en surface si leur quantité dépasse la capacité d'infiltration dans le sol.

La proportion d'eau dans chaque endroit varie selon les caractères du sol (propriétés et qualités), la longueur et l'inclinaison des pentes, la température ambiante, les conditions climatiques et la gestion des terres cultivées.



L'eau se déplace, selon le phénomène de percolation, à travers les pores et les fissures du sol jusqu'à une zone de saturation, qu'on appelle la nappe phréatique.

Éléments nutritifs et eaux de surface

Tard au printemps, lorsque l'eau tombe sur un sol dénudé, environ les deux tiers s'évaporent dans l'atmosphère, le quart s'écoule vers des étangs, des cours d'eau, des lacs et d'autres baissières, et le reste s'infiltré dans le sol.

La répétition de monocultures sarclées, la diminution des pratiques culturales fondées sur les fourrages, et les gros équipements utilisés sur des sols détrempés sont autant de facteurs qui aggravent le compactage du sol et, du coup, réduisent la percolation de l'eau dans le sol. En conséquence, la quantité d'eau qui s'accumule à la surface des champs risque d'augmenter.

En abondance, les eaux de ruissellement sont une source d'inquiétudes majeure puisqu'elles peuvent entraîner de la terre et des intrants culturaux (p. ex. des phosphates provenant d'engrais commerciaux ou de fumiers, et même des pesticides) susceptibles de causer la pollution des eaux de surface. De plus, les eaux de surface en excès risquent de causer l'érosion du sol. Or, l'érosion du sol altère la qualité de l'eau en ce qu'elle occasionne le transfert d'une charge de sédiments importante vers des cours d'eau. Les sédiments se composent de terre arable, de produits agrochimiques et d'éléments nutritifs (c.-à-d. N et P), sans compter une multitude de micro-organismes et, notamment, des agents pathogènes.

Les éléments nutritifs et l'eau souterraine

L'eau pénètre dans le sol par les pores et les fissures, de même que par les trous et galeries creusés par les racines, les vers, les insectes et les animaux. En s'enfonçant sans interruption dans le sol, certaines de ces cavités (les macropores) constituent pour le fumier et les éléments nutritifs des voies d'accès directes à l'eau souterraine ou aux tuyaux de drainage, exposant ces milieux à la pollution.

La quantité d'eau qui pénètre dans le sol varie selon les caractéristiques du sol et la gestion.

Certaines caractéristiques naturelles exercent une influence sur la quantité d'eau qui se trouve dans le sol, notamment le type de sol, sa structure, l'inclinaison du terrain, la profondeur de la nappe phréatique et de la roche-mère, les précipitations, la saison et les conditions climatiques.

Les pratiques de gestion sont un autre facteur déterminant. Les sols sur lesquels on laisse beaucoup de résidus de cultures permettent une plus grande infiltration d'eau et, en conséquence, restent plus humides. Il en va de même pour les sols très riches en matière organique.

Type de sol

Le type de sol, c'est-à-dire sa texture (p. ex. loam sableux ou argile) détermine sa capacité à retenir l'eau et aussi à la rendre disponible pour les cultures.

La capacité de rétention de l'eau d'un sol est également fonction de sa richesse en matière organique et du nombre de couches qui le composent. Les sols composés de couches de textures différentes sont dits « stratifiés ». Ils ralentissent le mouvement de l'eau descendant à travers le profil du sol.

En sols homogènes, la nappe phréatique monte et descend selon les saisons. Quand une couche dense limite le déplacement de l'eau, il se crée parfois une nappe phréatique suspendue – cette couche peut exister à l'état naturel ou résulter de pratiques culturales.

Pour préserver ou améliorer l'état du sol et contrôler efficacement l'eau qu'il contient, il faut tout d'abord connaître le type de sol avec lequel on a affaire.

LESSIVAGE DES ÉLÉMENTS NUTRITIFS

Les éléments nutritifs en solution sont emportés par l'eau dans le sol. Le lessivage se produit quand ces éléments nutritifs (p. ex. les nitrates) arrivent sous la zone racinaire par le moyen des pores et des larges fissures du sol. Le degré de lessivage dépend des facteurs suivants :

- la concentration des éléments nutritifs dans la solution de sol;
- la quantité totale d'éléments nutritifs disponibles dans le sol;
- la texture du sol – l'eau se déplace rapidement dans les sols sableux et les sols argileux fissurés;
- la stratification du sol – elle ralentit le mouvement de l'eau dans le profil du sol;
- les fragments grossiers – les cailloux et le gravier en abondance prédisposent au lessivage;
- la profondeur du sol jusqu'à la roche-mère ou à la nappe phréatique – plus la couche de sol est mince, plus vite se déplace l'eau.

Les particularités d'un site qui influent le plus sur les risques de contamination de l'eau souterraine sont :

- la texture du sol;
- la profondeur de la roche-mère;
- la profondeur de l'eau souterraine.

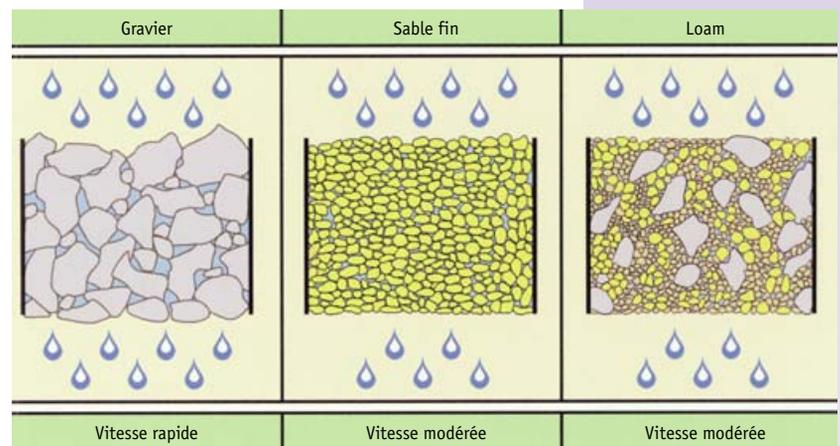
Texture du sol

La texture du sol, qui fait référence à la grosseur de ses particules, est le facteur le plus déterminant lorsqu'il s'agit d'évaluer la vitesse potentielle de l'eau et des contaminants dissous à travers le sol, jusqu'à l'eau souterraine.

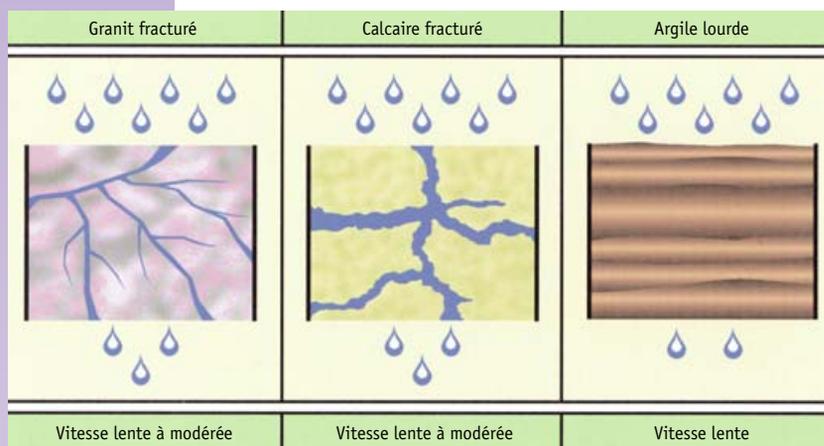
Les sols à texture grossière, tels que les sols graveleux ou sableux, possèdent de larges pores (espaces vides) entre leurs particules, ce qui permet à l'eau de les traverser rapidement pour atteindre l'eau souterraine.

Dans les sols à texture fine, tels que les argiles et les loams argileux, la percolation de l'eau et des contaminants dissous se fait très lentement. Ce genre de sol agit comme un filtre naturel qui favorise la dégradation biologique et chimique des contaminants avant qu'ils n'atteignent l'eau souterraine. Ils offrent donc une meilleure protection naturelle contre la pollution de l'eau souterraine.

On peut évaluer la texture du sol par palpation ou par analyse en laboratoire de la grosseur des particules. Les cartes pédologiques (cartes de sols) peuvent aussi aider à identifier la texture à un endroit précis.



La percolation de l'eau se fait rapidement dans les sables et les graviers, mais très lentement à travers l'argile.



La plupart des types de roche-mère se laissent pénétrer – p. ex., l'eau de surface peut emprunter des fentes et des fissures pour rejoindre une nappe phréatique peu profonde.

Profondeur de la roche-mère

Les aquifères peu profonds se trouvent souvent dans les régions où la roche-mère (substratum rocheux) est près de la surface. C'est le cas, en particulier, de certains types de substratums rocheux lorsqu'ils sont fracturés, p. ex. le calcaire, la dolomie, le grès et les schistes érodés.

Les affleurements de roche-mère fracturée favorisent le déplacement rapide de l'eau de surface et des contaminants jusqu'à l'eau souterraine. Lorsque la couche de sol recouvrant la roche-mère est peu profonde (moins que 90 cm ou 3 pi), il y a peu de chances que la filtration ou une entrave quelconque limite le débit des contaminants jusqu'à la roche-mère.

On peut mesurer la profondeur de la roche-mère au moyen d'outils à main ou d'équipements d'excavation mécanisés.

Les cartes de sols et les cartes géologiques de surface peuvent aider à connaître la profondeur de la roche-mère. Dans certains cas, l'affleurement de la roche-mère indique clairement que la couche de sol est mince. En outre, l'expérience acquise lors de travaux d'excavation ou lors du creusage pour l'installation d'une clôture dans une région donnée peut aussi s'avérer utile.

Profondeur de l'eau souterraine ou de la nappe phréatique

La filtration et le traitement de l'eau contaminée qui s'effectuent par des processus naturels ont lieu principalement dans la zone non saturée du sol, au-dessus de la nappe phréatique. Dans les endroits où la nappe phréatique est naturellement élevée, l'eau de surface et ses contaminants traversent en peu de temps la couche de sol non saturé et atteignent rapidement les aquifères peu profonds.

Le niveau de la nappe phréatique varie de façon appréciable selon la saison. En Ontario, son niveau est habituellement le plus haut au printemps et en automne.

On peut évaluer la profondeur de la nappe phréatique de différentes manières :

- creuser un trou en juin ou en septembre pour découvrir le niveau de l'eau libre dans le sol;
- repérer certaines couleurs caractéristiques dans le sol (taches de rouille et couleurs gris bleuâtre dans les horizons du sol) et identifier la méthode de drainage en se référant à une carte de sol locale afin de définir la classe de drainage en présence (p. ex. imparfait ou médiocre).

RÉDUCTION DES RISQUES DE CONTAMINATION DE L'EAU SOUTERRAINE PAR LE FUMIER DANS LES SOLS PEU PROFONDS

GROUPES HYDROLOGIQUES DE SOLS (GHS) :

Les sols sont classés en cinq groupes hydrologiques selon leur potentiel de ruissellement. Le classement prend en compte le déplacement de l'eau à travers le sol jusqu'à 90 cm (3 pi) de profondeur plutôt que seulement la texture du sol dans les vingt premiers centimètres (8 po) de surface. Les groupes hydrologiques de sols sont AA, A, B, C et D. Le groupe AA définit les sols ayant le plus petit potentiel de ruissellement et le groupe D rassemble ceux qui présentent le plus grand risque.

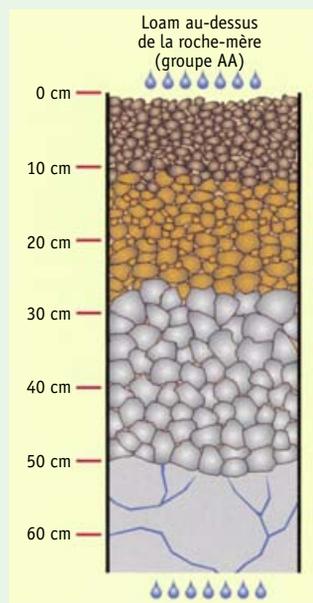
Les sols dont la roche-mère est peu profonde sont automatiquement reclassés dans le groupe hydrologique précédent en raison de cette caractéristique. Par exemple, un loam argileux dont la roche-mère est près de la surface classé dans le GHS D passerait au groupe C.

Tous les sols de l'Ontario ont été classés dans l'un ou l'autre des groupes hydrologiques. Le classement aide à évaluer les risques liés la charge en azote (indice-N) et les doses maximales imposées aux épandages d'éléments nutritifs projetés.

SOLS DONT LA ROCHE-MÈRE EST PEU PROFONDE :

Certains endroits révèlent un risque de contamination si grand qu'aucune application de fumier n'y est tolérée. À d'autres endroits qui affichent des risques pourtant élevés, une gestion éclairée en ce qui concerne le type de fumier choisi, le moment de son application et son enfouissement dans le sol permettent de ramener ces risques à un niveau acceptable.

- Aucun épandage de fumier n'est permis sur les affleurements de roche-mère, ni dans un rayon de 3 mètres (10 pi) de ceux-ci;
- Là où du fumier est appliqué sans travail du sol préalable ou subséquent, les prévisions météo doivent exclure toute possibilité de précipitation;
- Là où du fumier liquide est injecté dans le sol, la bande d'application doit malaxer la moitié de la surface du sol pour réduire le risque de mouvement descendant concentré du fumier.



Le groupe AA comprend tous les sols dont la roche-mère se situe à moins de 60 cm (< 2 pi) de la surface et aussi tous les sols du groupe A dont la profondeur jusqu'à la roche-mère est inférieure à 0,9 mètre (3 pi).

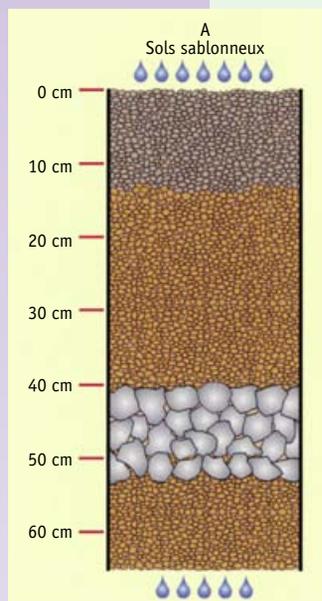
PROFONDEUR DE LA ROCHE-MÈRE	FUMIER LIQUIDE	FUMIER SOLIDE
0-15 cm (6 po)	aucun épandage	oct.-mai : aucun épandage; juin-sept. : < 22 t/ha (< 10 t. imp./ac)
15-30 cm (6-12 po)	oct.-mai : aucun épandage; travail du sol préalable ou < 40 m ³ /ha (< 3600 gal/ac)	travail du sol préalable, ou < 45 t/ha (< 20 t. imp./ac)
30-90 cm (1-3 pi)	travail du sol préalable ou < 40 m ³ /ha (< 3600 gal/ac)	aucune restriction

SOLS OÙ L'EAU SOUTERRAINE EST PEU PROFONDE :

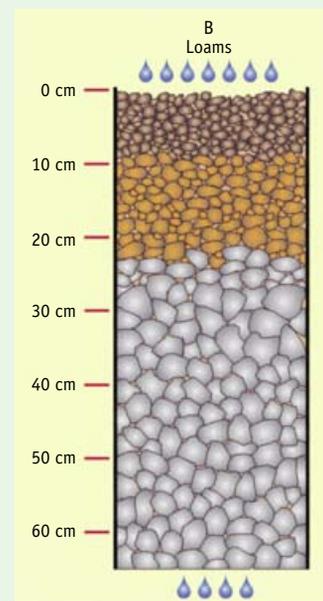
- En général, les ornières et le risque d'enlèvement suffisent à empêcher l'application de fumier dans les sols saturés, où la nappe phréatique est près de la surface — évaluer le risque de contamination selon les conditions au moment de l'épandage.

POTENTIEL DE CONTAMINATION DE L'EAU SOUTERRAINE

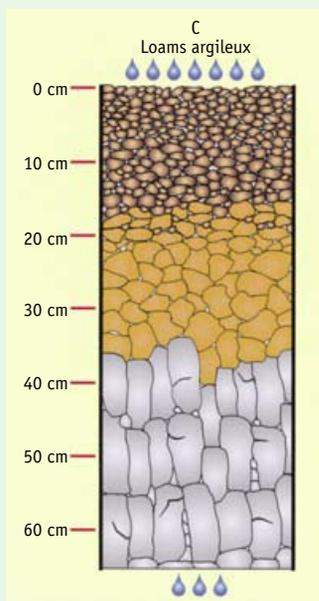
GROUPE HYDROLOGIQUE DE SOLS (TAUX D'INFILTRATION)	PROFONDEUR DU SOL NON SATURÉ AU MOMENT DE L'APPLICATION		
	< 30 cm (1 pi)	30–60 cm (1–2 pi)	60–90 cm (2–3 pi)
GROUPE A – SABLES (RAPIDE)	aucune application	risque élevé	risque moyen
GROUPE B – LOAMS (MOYEN)	aucune application	risque moyen	risque faible
GROUPE C – LOAMS ARGILEUX (LENT)	aucune application	risque faible	risque très faible
GROUPE D – ARGILES (TRÈS LENT)	aucune application	risque faible	risque très faible



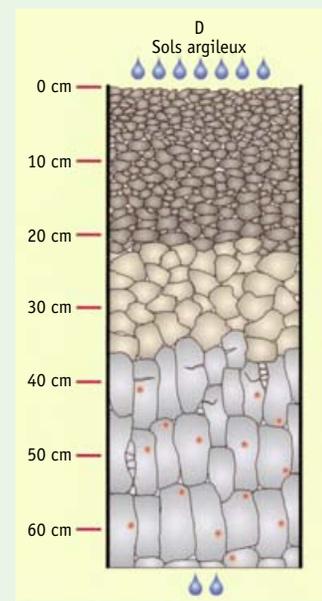
Le groupe A comprend les sols sableux, les sables loameux et les loams sableux. Ils ont tous un faible potentiel de ruissellement et des taux d'infiltration élevés, même à l'état de saturation. Ce sont principalement des sables ou graviers profonds, à drainage bon ou excessif et dont le taux d'infiltration est élevé.



Le groupe B comprend les loams limoneux et les loams. Il est caractérisé par des taux d'infiltration moyens à l'état de saturation et se compose principalement de sols profonds ou moyennement profonds, à drainage bon ou moyennement bon.



Le groupe C comprend les loams argileux sableux. Il est caractérisé par des taux d'infiltration faibles à l'état de saturation et se compose principalement de sols ayant une couche de terre dense qui entrave le mouvement descendant de l'eau et ayant une texture fine ou moyennement fine.



Le groupe D inclut : loams argileux ou limoneux argileux, argiles sableuses ou limoneuses, argiles. Il montre le plus grand risque de ruissellement et se caractérise par des taux d'infiltration très bas lorsque saturé, et se compose surtout de sols argileux très aptes à se gonfler, de sols où la nappe phréatique est toujours élevée, de sols ayant un pan argileux ou une couche d'argile en surface ou tout près, et de sols peu profonds recouvrant un matériau presque imperméable.

Voici les lignes directrices concernant l'application de fumier sur les sols des groupes A, B, C et D, dans le même ordre que précédemment :

POTENTIEL DE CONTAMINATION DE L'EAU SOUTERRAINE	FUMIER LIQUIDE	FUMIER SOLIDE
ÉLEVÉ	aucune application	travail du sol préalable et < 45 t/ha (< 20 t. imp./ac)
MOYEN	travail du sol préalable et < 40 m ³ /ha (< 3600 gal/ac)	travail du sol préalable
BAS	travail du sol préalable ou < 40 m ³ /ha (< 3600 gal/ac)	aucune restriction
TRÈS BAS	aucune restriction	aucune restriction

AZOTE : INDICE-N ET RISQUES ENVIRONNEMENTAUX

Certains des macro-éléments qui sont indispensables au maintien de la vie animale, végétale et édaphique (c.-à-d. du sol) altèrent la qualité de l'eau et de l'air quand ils sont présents en quantités excessives.

Quel que soit le mode d'application de l'azote sur le sol, une grande partie finira par être transformée en nitrate. Les plantes satisfont à la plupart de leurs besoins en azote sous forme de nitrates, ce qui s'explique jusqu'à un certain point par le fait qu'il s'agit de la forme d'azote inorganique la plus répandue dans le sol.

L'azote présent sous forme de nitrates est très soluble dans l'eau et, par conséquent, migre avec l'humidité du sol. La grande solubilité de l'azote permet aux racines de l'extraire d'à peu près n'importe quelle zone du sol où elles puisent de l'eau. À l'envers de la médaille, cette propriété a aussi un inconvénient : l'azote est très facilement lessivé dans le sol.



Toute concentration élevée d'azote et de phosphore dans l'eau favorise la croissance excessive des plantes aquatiques.

Sous forme de nitrate (NO_3^-), l'azote se déplace facilement avec l'eau du sol. Par conséquent, il peut traverser la zone racinaire et le sol sous-jacent, et se dissoudre dans l'eau souterraine.

La concentration de l'azote des nitrates dans le sol est susceptible de changer rapidement. Par temps chaud, la dégradation de la matière organique peut libérer de grandes quantités d'azote, tandis que par temps pluvieux les sols bien drainés risquent de perdre des nitrates à la faveur du lessivage ou, depuis les sols saturés, par transformation en gaz par les bactéries du sol selon le phénomène de dénitrification.

Dans le sol, l'azote emprisonné dans l'urée est converti en ammonium. Or, dans certaines circonstances, l'ammonium passe aisément à l'état gazeux (ammoniac). C'est ainsi qu'une grande part de l'azote retenu dans l'urée peut se dissiper dans l'air lorsque, par temps chaud et humide, on laisse de l'urée à la surface du sol ou sur des résidus de cultures sur un sol très humide.

Devenir de l'azote provenant du fumier

Dans le fumier, l'azote se trouve sous forme organique et inorganique. La forme la plus abondante varie en fonction du type de fumier (liquide ou solide).

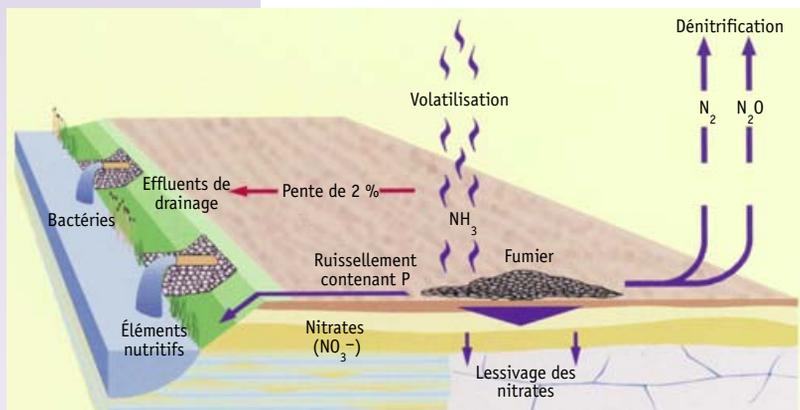
L'**ammonium** (NH_4^+) est une forme inorganique qui joue un rôle clé. En effet, étant biodisponible, le NH_4^+ facilite la croissance des plantes, mais il est très volatil une fois converti en gaz ammoniac (NH_3). Le NH_4^+ peut poser problème lorsqu'il rejoint l'eau de surface car sa toxicité entraîne la mort des poissons.

L'azote organique du fumier, bien que plutôt stable, finit par se transformer en ammonium par minéralisation. Dans le sol, l'ammonium est retenu par les particules d'argile et de matière organique. Il est biodisponible et sujet à la nitrification — un processus par lequel les micro-organismes le convertissent en nitrite et en nitrate (NO_3^-).

Le nitrate (NO_3^-) du sol peut :

- être assimilé par la végétation,
- être immobilisé par les micro-organismes,
- être lessivé dans le sol au-delà de la zone racinaire,
- se retrouver dans les eaux ruisselant à la surface des terres cultivées,
- dans les sols détrempés, être converti en gaz comme l'azote gazeux (N_2) et l'oxyde de diazote (N_2O) par les micro-organismes, selon le processus de dénitrification. Nota : L'azote représente 78 % de l'atmosphère, et l'oxyde de diazote, un gaz à effet de serre, a une capacité de réchauffement égale à 300 fois celle du dioxyde de carbone.

L'eau de ruissellement contaminée par du fumier est nocive pour l'habitat aquatique car l'ammoniac qui s'en échappe peut causer la mort des poissons.



L'azote contenu dans le fumier épandu augmente la réserve d'ammonium et de nitrate dans le sol. Une certaine portion de cet azote est rejetée sous forme d'ammoniac (NH_3). Par ailleurs, les plantes sont aptes à assimiler une grande part de l'ammonium et du nitrate. Tout nitrate que les plantes n'utilisent pas est sujet au lessivage ou à la conversion en azote gazeux.

CYCLE DE L'AZOTE — Devenir des principaux éléments du cycle

APPORT DE N

PROCESSUS / DEVENIR

ENGRAIS COMMERCIAUX

l'azote gazeux (N₂) est fixé dans les engrais contenant de l'urée, de l'ammonium et du nitrate

FUMIERS

les fumiers solide et liquide, les eaux résiduaires et les biosolides contribuent à l'augmentation d'azote organique et inorganique dans le sol

LÉGUMINEUSE

l'azote gazeux (N₂) est fixé par les micro-organismes aux particules de sol et aux légumineuses, et constitue une source d'azote organique dans le sol

RÉSIDUS DE CULTURES

l'azote organique est produit par la décomposition du système racinaire des cultures et par les résidus de cultures (y compris les plantes couvre-sol)

ATMOSPÈRE

la chaleur et les éclairs ajoutent un peu de NO₃⁻ dans le sol

RÉSERVES DE N DANS LE SOL

PROCESSUS / DEVENIR

MATIÈRE ORGANIQUE

l'azote organique fait partie intégrante de l'humus (matière organique du sol)

AMMONIUM (NH₄⁺)

le NH₄⁺ est parfois retenu par les particules de sol et d'humus au niveau des sites d'échanges

NITRATE (NO₃⁻)

le NO₃⁻ dissous dans la solution de sol et dans l'eau est intercepté par les particules de sol

TRANSFORMATION DE N par les micro-organismes du sol

PROCESSUS / DEVENIR

MINÉRALISATION

l'azote organique se dégrade en ammonium

NITRIFICATION

l'ammonium est transformé en nitrate

IMMOBILISATION

l'ammonium et le nitrate sont liés par les organismes vivant dans le sol

VOLATILISATION

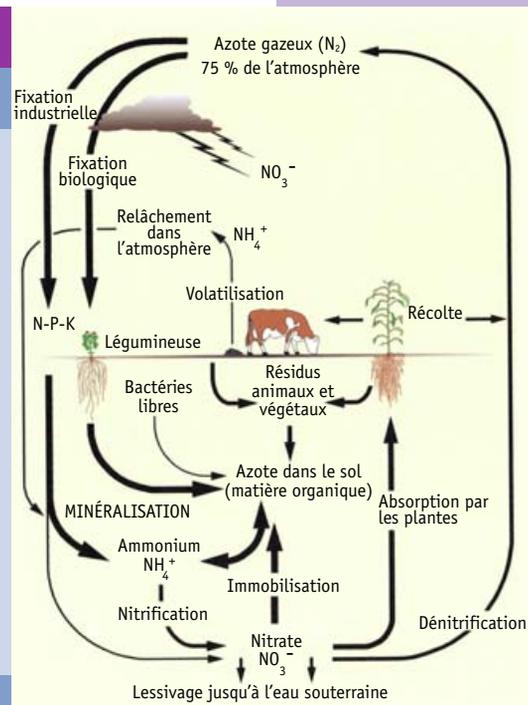
l'azote de l'ammonium est converti en azote gazeux

DÉNITRIFICATION

conversion du nitrate en gaz azotés, soit N₂ et N₂O

LESSIVAGE

le NO₃⁻ en solution dans le sol descend au-delà de la zone racinaire et risque de rejoindre l'eau souterraine



Comme il a été mentionné plus tôt dans ce chapitre, il existe de nombreux facteurs qui influent sur la facilité de l'azote et du phosphore à rejoindre l'eau de surface ou l'eau souterraine. Le type de sol, sa pente, la proximité de l'eau de surface et de l'eau souterraine, les conditions climatiques, la saison de l'année, les pratiques de gestion et le niveau de fertilité sont autant de facteurs qui font augmenter ou diminuer les risques de contamination de l'eau.

Pour évaluer ces risques, on étudie séparément pour chaque site tous les facteurs qui entrent en jeu. Une fois qu'on les a tous mis en balance, on obtient l'indice-azote et l'indice-phosphore, qui donnent une idée claire des risques. On explique dans la section suivante le fonctionnement de ces indices.

L'indice-azote

L'indice-azote (indice-N) est une indication mathématique qui permet de réduire les risques de contamination de l'eau souterraine par le nitrate. Il évalue la vulnérabilité des pratiques de gestion des éléments nutritifs à tout déplacement indésirable du nitrate. Le calcul de l'indice-N intègre les facteurs de risque liés à la source et au déplacement du nitrate afin d'évaluer le risque de migration du nitrate vers l'eau de surface, pour chaque champ.

Le cycle de l'azote est complexe, et les facteurs qui contribuent aussi bien à la source de nitrate qu'à son déplacement entrent souvent en interaction. Dès que l'azote du fumier est transformé en nitrate, il a plutôt tendance à migrer avec l'eau dans le sol qu'à se lier aux particules de sol.

Facteur de risque lié à la source

La quantité nette de nitrate dans le sol après la récolte peut provenir :

- de l'azote appliqué pour la culture de la campagne agricole en cours;
- des éléments nutritifs apportés après la récolte;
- de l'azote résiduel puisé dans les résidus de culture, en particulier de légumineuses;
- de l'azote minéralisé et des matières nitrifiées issus de la matière organique du sol.

L'azote apportée pour la culture de la campagne agricole en cours représente la quantité d'azote apporté qui excède les besoins de la culture. En fait, c'est le point qui suscite le plus d'inquiétudes.

Les éléments nutritifs apportés après la récolte (p. ex. le fumier épandu sur le champ) font augmenter le risque de migration du nitrate vers l'eau souterraine. L'époque de l'épandage, le mode d'application et le type de fumier sont des facteurs qui influent sur ce risque.

Facteur de risque lié au déplacement

Le facteur déplacement permet d'évaluer l'occasion qu'a le nitrate de traverser le sol, avec l'eau, jusqu'à l'eau souterraine.

En Ontario, pendant la saison de croissance, les cultures retirent habituellement du sol plus d'eau que les précipitations n'en apportent, de sorte qu'il n'y a aucun lessivage à cette époque de l'année sauf pendant les périodes anormalement pluvieuses.

Par contre, à l'automne, en hiver et tôt le printemps, les précipitations apportent plus d'eau au sol qu'il ne s'en évapore et, conséquemment, l'eau a de plus fortes chances de descendre à travers le profil de sol. Voilà pourquoi on s'inquiète de la quantité de nitrate qui reste dans le sol après la saison de croissance, à l'époque où aucune culture ne s'y trouve pour assimiler le nitrate et où le risque de perte est élevé. Les plantes couvre-sol cultivées après la récolte de la culture principale contribuent à réduire le risque en s'appropriant des éléments nutritifs et en les retenant sous forme organique jusqu'au printemps.

Le risque de migration de l'azote est plus grand dans les sols peu profonds.



PHOSPHORE : INDICE-P ET RISQUES ENVIRONNEMENTAUX

Le phosphore (P) est associé à la fraction solide du fumier. Par conséquent, il est plus abondant dans les fumiers solides.

On appelle phosphates (p. ex. PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^-) les formes que prennent le phosphore inorganique en solution. Les phosphates sont très réactifs dans le sol : ils se lient aisément au calcium, au magnésium, au fer, au manganèse et à l'aluminium et sont adsorbés par les particules du sol (retenus à leur surface).

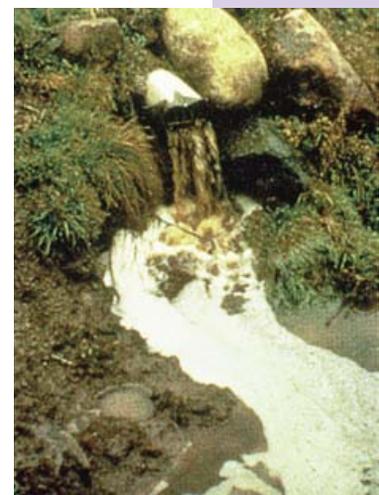
Dans les sols acides (pH bas), le phosphore est immobilisé dans des composés du fer, du manganèse et de l'aluminium. Par contre, dans les sols alcalins (pH élevé), on peut trouver le phosphore fixé à la surface des particules d'argile et d'humus ou lié dans des composés du calcium et du magnésium. Une très faible part du phosphore (seulement 5 %) est assimilable par la végétation, peu importe le moment.

Les phosphates en solution dans le sol sont très réactifs. Ils peuvent devenir immobilisés très rapidement ou assimilés par les plantes. Toutefois, une grande part du phosphate prend une forme convenant à sa mise en réserve et se trouve restitué progressivement dans la solution pour compenser la quantité assimilée par les plantes. Comme il ne se déplace pas avec l'eau du sol, le phosphore est peu susceptible d'être lessivé.

En raison du fait que les basses températures ralentissent la croissance des racines et l'absorption des éléments nutritifs, les plantes se voient souvent incapables d'obtenir suffisamment de phosphore par temps froid, en particulier lorsqu'elles sont petites.

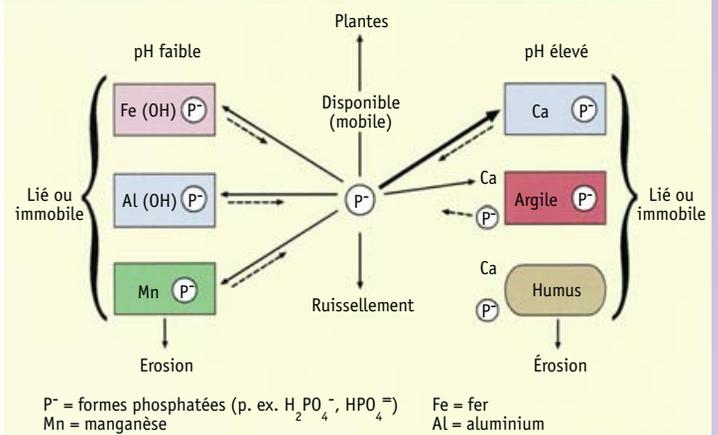


Le phosphore du sol se trouve souvent fixé aux particules de sol et, par conséquent, peut rejoindre les eaux de surface à la faveur du ruissellement sur les terres cultivées.



Les eaux de surface sont menacées de pollution par certaines fermes laitières qui évacuent directement dans un réseau de drainage souterrain leurs eaux usées de lavage contenant des détergents à base de phosphate.

PHOSPHORE DU SOL — FORMES, DEVENIR ET DISPONIBILITÉ



Les phosphates sont très réactifs dans le sol. Dans les sols acides, on trouve souvent le phosphate lié à des composés du fer, de l'aluminium et du manganèse, tandis que dans les sols alcalins (pH élevé), il peut être lié à des composés du calcium et du magnésium, et aussi aux particules d'argile et à la matière organique.



En Ontario, le phosphore est un facteur limitant pour la prolifération d'algues. En réduisant la quantité de phosphore dans les eaux de surface, on freine du même coup la prolifération des algues.

Le devenir du phosphore

Au cours de l'année d'application, le fumier ne rend disponible que 40 % du phosphore qu'il contient, comparé aux engrais commerciaux. En d'autres mots, 45 kg (100 lb) de P_2O_5 provenant du fumier ont une valeur fertilisante équivalant à 18 kg (40 lb) de P_2O_5 fourni par un engrais commercial. Par contre, cet écart se rétrécit beaucoup quand on étudie l'évolution à long terme du phosphore disponible dans le sol (dosage du P par analyse de sol). En effet, au fil des ans, 80 % du phosphore provenant du fumier devient biodisponible.

En solution, les phosphates peuvent être assimilés par les plantes ou relâchés dans l'environnement à la faveur des eaux de ruissellement, et une infime quantité peut traverser les fissures du sol pour atteindre la zone racinaire. Tout phosphore qui finit par rejoindre des eaux de surface favorisera la prolifération d'algues. Au fur et à mesure que les algues meurent et se décomposent, la concentration de l'oxygène dans l'eau chute à des niveaux qui sont néfastes pour les poissons et d'autres formes de vie aquatiques.

L'indice-phosphore

L'objectif visé par l'indice-phosphore (indice-P) est de quantifier les risques de contamination des eaux de surface par les épandages de matières nutritives sur des terres cultivées. Par exemple, l'indice-P révèle clairement que dans les champs où les analyses de sol ont confirmé que la concentration de phosphore est élevée et où le potentiel d'érosion est grand, le risque de contamination de l'eau de surface par l'application de fumier est élevé lui aussi. Dans un tel cas, il y a probablement lieu de limiter l'épandage de phosphore ou de protéger le champ contre l'érosion. Le tableau suivant donne un aperçu des caractéristiques des champs et des pratiques de gestion qui sont prises en compte dans le calcul de l'indice-P.

FACTEURS PRIS EN COMPTE DANS LE CALCUL DE L'INDICE-P POUR ÉVALUER LES DISTANCES DE RETRAIT MINIMUM DES ÉPANDAGES PAR RAPPORT À DES COURS D'EAU

FACTEUR DÉTERMINANT	DONNÉES OU MESURES NÉCESSAIRES AU CALCUL
CARACTÉRISTIQUES NATURELLES DU CHAMP – influent sur le potentiel d'érosion et de ruissellement	<ul style="list-style-type: none"> • érodabilité et texture du sol • longueur de la pente • déclivité de la pente (à proximité d'un cours d'eau) • énergie des pluies • distance jusqu'à des cours d'eau
PRATIQUES DE GESTION DU CHAMP – sont adaptées au potentiel d'érosion du sol	<ul style="list-style-type: none"> • méthode de travail du sol (p. ex. semis direct) • opérations en contre-pente ou culture en courbes de niveau • rotation culturale, fourrages, cultures couvre-sol
GESTION DES ÉLÉMENTS NUTRITIFS – prend en compte le niveau de P actuel ainsi que le mode et la dose d'épandage du phosphore dans le champ	<ul style="list-style-type: none"> • niveau de fertilité du sol • doses d'épandage du fumier et des engrais • méthode d'application du fumier et des engrais (p. ex. enfouie, laissé en surface)

Nota : On ne tient pas compte des distances minimales requises qui découlent de l'indice-P pour les épandages de matières nutritives contenant du phosphore lorsque le dosage du P par analyse de sol indique une concentration de P inférieure à 30 ppm.

Même si l'indice-P calculé pour un champ en particulier est élevé, il n'est souvent pas nécessaire de limiter l'application de phosphore dans tout le champ. On pourrait, par exemple, réduire les taux d'épandage dans les zones situées le long d'un cours d'eau qui sont susceptibles de le contaminer directement, et dans les zones ayant un grand potentiel de déchargement de sédiments contaminés dans le cours d'eau.



L'indice-P est plus élevé pour les champs très inclinés.

POTASSIUM

Dans le fumier, le potassium (K) est soit organique, soit inorganique. Environ 75 % du K se trouvent dans la fraction liquide du fumier et sont totalement biodisponibles. Les 25 % restants composent la partie organique des solides du fumier.

Dans le sol, le K peut-être :

- non disponible — 90 à 98 % du K sont retenus dans les minéraux,
- lentement rendu disponible — jusqu'à 10 % du K retenu par les minéraux d'argile,
- disponible — seulement 1-2 % est en solution ou lié à des minéraux. Les ions K sont lessivés dans les sols sableux.

En dépit de sa faible disponibilité relative dans le sol, le potassium est maintenu en équilibre dynamique. En effet, les ions K assimilés par les plantes sont rapidement remplacés dans le sol par le potassium échangeable tiré des réserves du sol.

En Ontario, le potassium de sources agricoles ne constitue pas une menace pour la qualité de l'eau parce que le potassium biodisponible est en équilibre constant avec les formes de K non disponibles dans le sol. La quantité de potassium qui est soumise au lessivage ou qui se retrouve dans le ruissellement à la surface des terres cultivées est extrêmement faible. Elle ne représente pas un facteur limitant pour la croissance des plantes aquatiques.



Avertissement : De hauts niveaux de potasse dans le sol (analyse de sol) et des teneurs en potasse élevées dans le fumier peuvent entraîner des concentrations de potassium élevées dans les fourrages et, du coup, causer la fièvre vitulaire chez la vache laitière. Pour éviter ce problème, on peut servir du foin pauvre en K, qui est produit ailleurs, et/ou mélanger le foin riche en K avec des aliments fourragers qui en sont mal pourvus, comme l'ensilage de maïs, ou encore recourir à l'équilibrage des anions et des cations.

RÉSUMÉ DES PERTES D'ÉLÉMENTS NUTRITIFS PROVENANT DU FUMIER ET DE LEURS INTERACTIONS AVEC LE CYCLE DE L'EAU

PROCESSUS	DÉTAILS
VOLATILISATION	<ul style="list-style-type: none"> • elle correspond à la perte d'ammoniac libre (NH_3) dans l'atmosphère • l'ammonium (NH_4^+) qui se trouve dans le fumier se transforme rapidement en ammoniac • le fumier contenant de fortes concentrations de NH_4^+ produit plus facilement de l'ammoniac (NH_3) • le taux de déperdition varie selon la température et l'humidité de l'air, la vitesse du vent, la teneur en eau du sol, son pH, le couvert végétal, la pluviosité et l'infiltration — les pertes sont les plus grandes par temps ensoleillé, chaud et sec • les pertes augmentent en même temps que la superficie d'exposition — l'enfouissement/ incorporation abaisse les pertes
DÉNITRIFICATION	<ul style="list-style-type: none"> • l'azote qui se trouve dans le fumier (ammonium) se transforme en nitrate et en nitrite par nitrification • dans les sols saturés, les nitrates sont convertis par les micro-organismes en azote gazeux (N_2) • dans les sols et milieux à demi-saturés (structures de stockage), les micro-organismes transforment les nitrates en oxyde de diazote (N_2O)
RUISSELLEMENT ET ÉROSION	<ul style="list-style-type: none"> • le fumier épandu et laissé en surface est sujet au ruissellement • les éléments nutritifs contenant P et N dans le fumier sont rejetés dans l'environnement à la faveur des matières érodées et du ruissellement • les taux d'érosion et de ruissellement augmentent avec la déclivité, la lenteur d'infiltration, le compactage du sol, le gel du sol, la rareté de la végétation ou de la culture couvre-sol, l'abondance des précipitations et la rapidité de la fonte des neiges
LESSIVAGE	<ul style="list-style-type: none"> • il correspond au déplacement des solutions de sol et de leurs solutés hors du profil de sol ou de la zone racinaire • ce processus se produit uniquement lorsque la concentration de nitrates (et/ou de bactéries) dans la zone racinaire est élevée et qu'il y a un déplacement net de l'eau à travers le profil de sol • les sols sableux et graveleux dans lesquels la nappe phréatique est élevée sont le plus prédisposés au lessivage • les principales sources de nitrate sont : <ul style="list-style-type: none"> ○ le fumier mal stocké (p. ex. fumier solide non recouvert, fumier composté sur terre dénudée) ○ les engrais azotés ○ la minéralisation dans le fumier épandu et les légumineuses
EFFLUENTS DU RÉSEAU DE DRAINAGE	<ul style="list-style-type: none"> • ils correspondent à l'évacuation en masse des matières liquides épandues par les exutoires de drainage • tous les éléments nutritifs (N, P et K) et toutes les bactéries qui se trouvent dans le fumier peuvent rejoindre les eaux de surface, à mesure que les effluents s'infiltrent dans les fissures et macropores continues des sols non travaillés au préalable • le problème se pose le plus souvent dans les sols non travaillés et dans les sols portés à se fissurer
IMMOBILISATION	<ul style="list-style-type: none"> • c'est le processus par lequel les micro-organismes lient les éléments nutritifs dans le sol • les populations de micro-organismes sont assez nombreuses et diversifiées pour retirer les nitrates et phosphates disponibles de la solution de sol avant que les plantes puissent les utiliser • le taux d'immobilisation varie selon le ratio carbone-azote (C:N) dans les résidus de cultures ou dans le fumier ajouté au sol <ul style="list-style-type: none"> ○ en présence de matières ayant un ratio carbone-azote élevé, comme la litière de paille ou de sciure de bois, les micro-organismes lient tout nitrate disponible ○ après un certain temps, les micro-organismes manquent d'aliments (carbone) et relâchent de l'azote une fois qu'il y a eu minéralisation
FIXATION	<ul style="list-style-type: none"> • les phosphates sont très réactifs dans le sol et s'associent avec le calcium, le magnésium, le fer, le manganèse ou l'aluminium, et se fixent aux particules de sol • en tout temps, une petite proportion de phosphates reste en solution, mais ils en sont retirés rapidement • la plus grande part du phosphate garde sa forme propre à sa mise en réserve et se retrouve dans la solution de sol pour compenser la quantité assimilée par les plantes

MICRO-ÉLÉMENTS ET OLIGO-ÉLÉMENTS

Les fumiers sont riches en micro-éléments requis par les cultures comme le bore, le chlore, le fer, le molybdène et le zinc. Ils sont aussi une source de micro-éléments nécessaires à la santé des animaux comme le zinc, le cuivre, le sélénium, le chrome, l'iode et le cobalt.

Le type de fumier et les pratiques de gestion influent directement sur la concentrations de micro-éléments chez les cultures et les animaux. Par exemple, les fumiers de porcs et de volaille sont souvent mieux pourvus que les autres types. Il s'ensuit qu'au chapitre de la fertilité des sols les épandages annuels de fumier en vue de satisfaire les besoins en N et P peuvent occasionner des teneurs du sol en certains micro-éléments plus élevés que prévus.

Des recherches techniques ont signalé une accumulation d'éléments, tels que le cuivre et le zinc, dans des champs qui ont eu des applications de fumier abondantes. Toutefois, des études récentes sur la teneur en éléments nutritifs des fumiers n'ont pas réussi à révéler que les terres de l'Ontario avaient un tel problème en comparaison avec les normes visant les biosolides. L'avertissement qu'on en tire est de ne pas donner au bétail des aliments et des compléments médicamenteux qui dépasseraient les besoins nutritionnels en micro-éléments, sous peine d'altérer la qualité des sols à long terme.

Les moyens suivants permettent de contrôler la teneur du sol en micro-éléments :

- surveiller les concentrations des micro-éléments dans les aliments et les traitements vétérinaires;
- faire analyser le fumier et le sol pour en connaître les niveaux de micro-éléments qui serviront de points de référence;
- adapter le plan de gestion des éléments nutritifs et les épandages, s'il y a lieu, en vue de hausser les teneurs là où il le faut, tout en évitant les accumulations excessives.

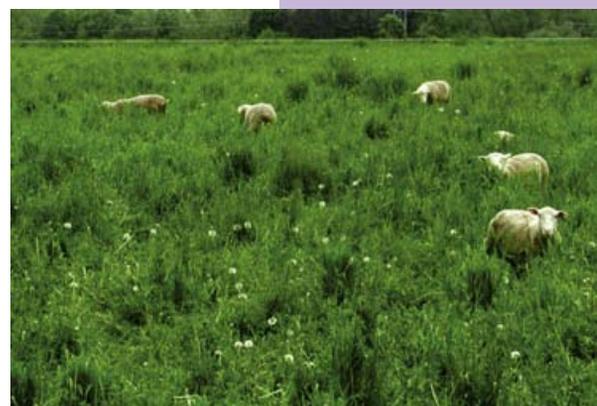
L'APPROCHE SYSTÉMATIQUE DANS LA PLANIFICATION DE LA GESTION DES ÉLÉMENTS NUTRITIFS

Toute planification qui se veut efficace repose avant tout sur une bonne compréhension des sources d'éléments nutritifs, de leurs compositions variables et des pertes dont ils sont susceptibles. Il faut ensuite prendre en compte les éléments nutritifs dans sa propre exploitation et évaluer les risques de pertes qui la caractérisent.

Ne jamais perdre de vue l'ensemble du système. Bien réfléchir à ce qu'on tente d'évaluer et de planifier dans le cadre d'un **système de gestion**. Le système de gestion se compose d'une série de pratiques à la fois distinctes et interreliées (p. ex. l'application d'éléments nutritifs) ou de groupes de pratiques (p. ex. la nutrition et l'alimentation du bétail) qui exercent une influence sur les résultats de la gestion.

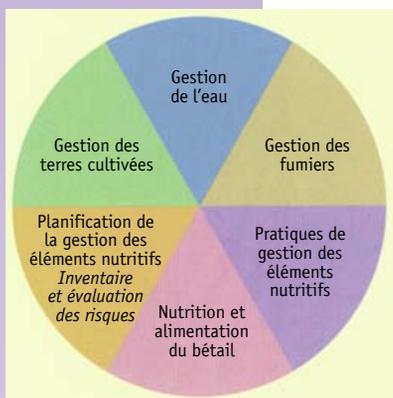
Un système de gestion global saura comprendre toutes les composantes clés qui sont susceptibles de modifier les résultats attendus. Dans un système de gestion global, **tout changement envisagé a des effets sur les autres composantes du système et sur le système lui-même**.

On qualifie d'**approche systématique** le système de gestion selon lequel on cherche à prévoir et à évaluer les répercussions d'une pratique précise sur les autres composantes du système.



Les moutons ont une faible tolérance au cuivre dans leur ration — il y a donc lieu de faire doser les micro-éléments du fumier avant d'en épandre sur les pâturages pour ovins.

COMPOSANTES



Appliquée à la planification de la gestion des éléments nutritifs, l'approche systématique inclura les composantes ci-dessous.

1 Gestion de l'eau

- déterminer la proximité des eaux de surface, la profondeur des nappes phréatiques et des aquifères, et élaborer des pratiques de gestion concernant le drainage, l'irrigation et l'eau de surface;

2 Gestion des éléments nutritifs — Inventaire et évaluation des risques

- prendre en compte toutes les sources d'éléments nutritifs et leurs concentrations dans les opérations agricoles, et évaluer les risques environnementaux et les limites acceptables;

3 Pratiques de gestion des éléments nutritifs

- faire doser les éléments nutritifs (analyses), en choisir les sources, dresser un calendrier des épandages, équilibrer les applications et évaluer les répercussions;

4 Nutrition et alimentation du bétail

- mettre l'accent sur la réduction, la modification, la supplémentation et l'examen attentif des rations et des pratiques alimentaires en vue d'améliorer l'efficacité et de réduire les intrants;

5 Gestion des fumiers

- élaborer des systèmes de collecte, de transfert, de stockage et de manutention des fumiers et d'autres matières de rebuts;

6 Gestion des terres cultivées

- adopter des pratiques de gestion optimales qui veillent à la protection du sol et de l'eau et réduisent les pertes d'éléments nutritifs — inclure la conduite des cultures et le travail du sol.

L'approche systématique est la meilleure façon d'aborder l'élaboration du plan de gestion des éléments nutritifs. Le plan environnemental de ferme est un bon exemple d'une telle approche.

L'APPROCHE SYSTÉMATIQUE MISE EN ŒUVRE DANS UNE EXPLOITATION D'ÉLEVAGE

Pendant qu'il élabore son PGEN (Composante 2: Gestion des éléments nutritifs — Inventaire et évaluation des risques), un éleveur découvre que la plupart de ses champs ont une teneur en phosphore excessive. En conséquence, il :

- abaisse la concentration de P dans le fumier en servant moins de suppléments de phosphore à ses animaux (Composante 4 : Nutrition et alimentation du bétail);
- modifie ses pratiques d'application du fumier de manière à incorporer au sol tout le fumier épandu en surface (Composante 3 : Pratiques de gestion des éléments nutritifs);
- se conforme aux distances de retrait prescrites concernant les épandages (Composante 1 : Gestion de l'eau).

En mettant en œuvre l'approche systématique, cet éleveur de bétail a fait des économies sur les coûts des intrants et a réduit les répercussions néfastes sur la qualité de l'eau de surface.