

MANUEL DU BON USAGE DES NUTRIMENTS



Manuel du Bon Usage des Nutriments

IFA, WFO et GACSA

Première édition, novembre 2016

Copyright 2016 IFA, WFO et GACSA. Tous droits réservés.

La publication peut être téléchargée à partir des sites web IFA et WFO.



International Fertilizer Association

49 Avenue d'Iéna
75116 Paris
France
Tel: + 33 1 53 93 05 00
Fax: +33 1 53 93 05 45/47
publications@fertilizer.org
www.fertilizer.org



World Farmers' Organisation

Via del Tritone, 102
00187 Roma
Italy
Tel: +39 06 4274 1158
Fax: +39 06 4200 0750
info@wfo-oma.org
www.wfo-oma.com



GACSA Facilitation Unit

Food and Agriculture Organization
of the United Nations
Viale delle Terme di Caracalla
00153 Rome
Italy
GACSA-Facilitation-Unit@fao.org
www.fao.org/gacsa

L'objectif principal de ce guide est de fournir des informations générales sur le sujet concerné. Cette publication ne remplace aucun conseil professionnel et ne représente pas une approbation formelle des positions exprimées dans ce document.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT PROPOS

1. COMPRENDRE LA NUTRITION DES CULTURES ET LES ENGRAIS (ORGANIQUES ET MINÉRAUX)	1
1.1 NUTRIMENTS ESSENTIELS POUR DES CULTURES SAINES	1
1.2 QUELLES SONT LES PRINCIPALES SOURCES DE NUTRIMENTS ?	2
1.3 POURQUOI LES ENGRAIS SONT-ILS NÉCESSAIRES POUR DES SOLS SAINS ET DES CULTURES PRODUCTIVES ET NOURRISSANTES ?	5
2. GÉRER LES NUTRIMENTS DE FAÇON EFFICIENTE ET EFFICACE	7
2.1 QU'EST-CE QUE L'EFFICIENCE DE L'UTILISATION DES NUTRIMENTS ?	7
2.2 LES OBJECTIFS D'EFFICIENCE ET D'EFFICACITÉ SONT COMPLÉMENTAIRES	9
3. CYCLES AGRICOLES DES NUTRIMENTS ET VOIES DE PERTE	11
4. NÉCESSITÉ D'UNE GESTION RAISONNÉE DES NUTRIMENTS ET DE LA FERTILITÉ DU SOL	13
4.1 LES SOURCES MINÉRALES ET ORGANIQUES SONT COMPLÉMENTAIRES	13
4.2 BÉNÉFICES MULTIPLES DES APPROCHES DE GESTION RAISONNÉE DE LA NUTRITION DES PLANTES ET DE LA FERTILITÉ DU SOL	13
5. GESTION RESPONSABLE DES NUTRIMENTS	15
5.1 PRINCIPES DE BONNES PRATIQUES D'UTILISATION ET DE GESTION RESPONSABLE DES NUTRIMENTS	15
5.2 LA BONNE SOURCE DE NUTRIMENTS	17
5.3 LA BONNE QUANTITÉ	18
5.4 LE BON MOMENT	20
5.5 LE BON PLACEMENT	21
6. GESTION DES NUTRIMENTS EN FONCTION DES PRINCIPALES CONSIDÉRATIONS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE	23
6.1 GESTION DES NUTRIMENTS ET SÉCURITÉ ALIMENTAIRE ET NUTRITIONNELLE	23
6.2 GESTION DES NUTRIMENTS ET SANTÉ DU SOL	24
6.3 INTERACTIONS EAU X NUTRIMENTS	26
6.4 GESTION DES NUTRIMENTS ET CHANGEMENT CLIMATIQUE	27
6.5 GESTION DES NUTRIMENTS ET ENVIRONNEMENT	30
7. POINTS CLÉS	33
RÉFÉRENCES	35

EFFICACITÉ : qualifie une pratique qui produit l'effet attendu, par exemple l'aptitude d'un nutriment à produire de la masse végétale (rendement).

EFFICIENCE : qualifie une pratique qui permet de parvenir à un maximum de résultats avec un minimum de ressources, par exemple aptitude d'un nutriment à se transformer en masse végétale.



AVANT-PROPOS

L'application équilibrée et précise des nutriments – aussi bien des matières organiques que des engrais minéraux - est un outil préalable et pertinent pour répondre au deuxième Objectif de Développement Durable visant à éradiquer la faim, assurer la sécurité alimentaire, améliorer la nutrition et promouvoir une agriculture durable. C'est aussi un élément essentiel de l'agriculture respectueuse du climat. La nutrition des plantes adaptée aux sols et aux cultures augmente la productivité agricole en vue d'assurer la sécurité alimentaire d'une population mondiale attendue à environ 10 milliards d'êtres humains d'ici 2050, mais aussi assure une absorption maximale des nutriments par les plantes et par là même une diminution des pertes de nutriments dans l'environnement, y compris des émissions de protoxyde d'azote. En augmentant durablement la productivité sur les terres arables, la fertilisation efficiente et efficace protège également les forêts et aide à maintenir ou augmenter la matière organique des sols, deux énormes puits de carbone. Dernier point, mais non des moindres, comme l'un des effets du changement climatique à long terme sera une augmentation de la température et du stress hydrique, une bonne nutrition des cultures aidera à renforcer leur résilience, une condition préalable à l'adaptation au changement climatique.

Les agriculteurs du monde entier sont en première ligne des immenses défis à relever dans le secteur agricole. Avec le déclin regrettable des services de vulgarisation observé dans de nombreuses parties du globe, des efforts renforcés sont nécessaires pour transmettre les connaissances relatives aux bonnes pratiques dans le domaine de la nutrition des plantes. A cette fin, WFO, IFA et GACSA sont heureux de publier ce manuel, qui vise à définir les principes clés d'une nutrition des plantes précise et équilibrée, d'aider les agriculteurs dans leur travail inestimable qui consiste à nourrir la population tout en améliorant et en préservant l'état des sols dans un climat en évolution.

Construisant sur les bases d'une agriculture respectueuse du climat et sur des principes de gestion raisonnée de la fertilité des sols, qui appellent à combiner toutes les sources de nutriments avec des pratiques de gestion des sols et une sélection de variétés appropriées, et sur les « 4B » de la gestion des nutriments, à savoir déterminer - sur la base d'une recherche spécifique aux cultures et aux sols – 1) la bonne source d'engrais (adapter les types d'engrais aux besoins de la culture) ; 2) la bonne quantité (ajuster la quantité d'engrais aux exigences de la culture) ; 3) le bon moment (rendre les nutriments disponibles selon le cycle de développement des cultures) ; et 4) le bon placement (en plaçant les nutriments là où les cultures peuvent le mieux y accéder),

ce manuel fournit des informations utiles et pratiques destinées à faciliter une nutrition efficace et efficace des cultures par les opérateurs agricoles.

Ce Manuel du Bon Usage des Nutriments fournit aux agriculteurs et organisations agricoles des informations pratiques utiles et simples sur la combinaison des engrais et leurs effets sur la croissance des plantes et la santé des sols, y compris des directives sur les techniques efficaces de fertilisation qui devront être adaptées aux spécificités des cultures, des conditions climatiques et des sols.

Cet effort conjoint de WFO, IFA et GACSA est un bon exemple de partenariat multipartite pour promouvoir le deuxième Objectif de Développement Durable et l'agriculture climato-intelligente, et nos trois organisations s'engagent à diffuser leurs recommandations aux groupes agricoles du monde entier.

1.

COMPRENDRE LA NUTRITION DES CULTURES ET LES ENGRAIS (ORGANIQUES ET MINÉRAUX)

1.1

NUTRIMENTS ESSENTIELS POUR DES CULTURES SAINES

Condition préalable à la croissance, à la santé et à la production d'aliments nourrissants, les plantes ont besoin d'éléments nutritifs (nutriments) essentiels (macronutriments et oligo-éléments) en quantités suffisantes.

Dix-sept éléments se sont avérés essentiels pour les plantes : le carbone (C), l'hydrogène (H), l'oxygène (O), l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K), le soufre (S), le magnésium (Mg), le calcium (Ca), le fer (Fe), le manganèse (Mn), le zinc (Zn), le cuivre (Cu), le bore (B), le molybdène (Mo), le chlore (Cl) et le nickel (Ni). De plus, des éléments supplémentaires peuvent être essentiels pour quelques espèces végétales, comme le sodium (Na) et le cobalt (Co).

Le carbone, l'hydrogène et l'oxygène sont obtenus à partir de l'atmosphère et de l'eau et ne sont pas considérés comme des éléments minéraux. Les éléments essentiels restants peuvent être divisés en trois groupes : les macronutriments primaires (N, P et K), les macronutriments

secondaires (S, Mg et Ca) et les oligo-éléments (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl et Ni) sur la base de leurs concentrations moyennes dans les plantes.

Si un seul nutriment essentiel n'est pas disponible en quantité suffisante, il affecte la croissance des plantes et donc le rendement.

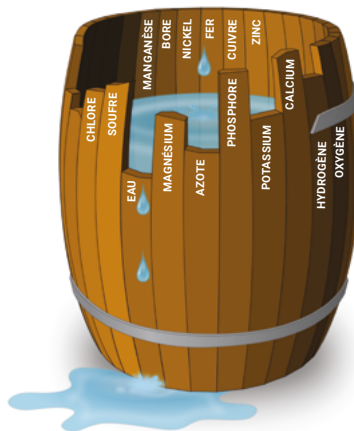


Illustration de la Loi du Minimum de Liebig qui stipule que le potentiel de rendement est déterminé par le facteur le plus limitant au champ.

La croissance des plantes est limitée par l'élément essentiel qui est le plus en dessous de son optimum. L'azote, le phosphore et le potassium sont généralement les éléments les plus

déficients mais, de nos jours, des éléments tels que le soufre, le zinc et le bore sont de plus en plus déficients dans les sols et les plantes, devenant de nouveaux facteurs limitants dans le monde.

1.2

QUELLES SONT LES PRINCIPALES SOURCES DE NUTRIMENTS ?

Les nutriments peuvent provenir de diverses sources :

- **L'altération des roches** est un processus lent qui libère une petite quantité de nutriments chaque année. Il est insuffisant pour atteindre des rendements moyens à élevés au fil du temps.
- **Les nutriments du sol** provenant d'applications précédentes, qui n'ont pas été absorbés par les cultures précédentes, sont soit perdus dans l'environnement, soit stockés dans le sol et potentiellement disponibles pour les cultures suivantes. Certains nutriments tels que l'azote et le soufre peuvent être sujets à des pertes importantes au cours de l'année d'application dans des conditions humides. Les nutriments tels que le phosphore et le potassium restent plus longtemps dans les sols, généralement plusieurs années, en fonction des types de sol, des précipitations et des pratiques agricoles.
- **La déposition atmosphérique** peut être importante dans certaines régions, en particulier pour l'azote et le soufre. En réponse aux réglementations réduisant les émissions de soufre pour atténuer les pluies acides, l'apport de cet élément a diminué au fil du temps et le soufre est devenu un facteur de plus en plus limitant.

La fertilisation soufrée devient une pratique courante dans les pays développés et de plus en plus dans les économies émergentes et en développement.

- **L'eau d'irrigation** peut également contenir des nutriments disponibles pour les cultures.
- **Les résidus de culture**, tels que les feuilles, tiges et racines, lorsqu'ils sont laissés sur ou dans le sol, libèrent les nutriments qu'ils contiennent. Les résidus de culture sont principalement riches en potassium. C'est pourquoi l'incorporation des résidus a été, au fil des ans, la principale source pour cet élément. Cependant, l'utilisation des résidus de culture comme combustible et aliments pour le bétail a progressivement épuisé les réserves de potassium dans le sol. La teneur en nutriments des résidus de culture varie grandement, et la quantité de nutriments disponibles pour les plantes qui sont libérés au cours du temps ne peut être déterminée qu'à partir de données locales.
- **Le compost** (matière organique qui a été décomposée) peut être ajouté aux sols pour fournir des nutriments et servir de conditionneur du sol. La qualité des composts peut varier en fonction des matières premières et des procédés utilisés.

- **Les effluents d'élevage** sont une source précieuse de nutriments. La teneur en nutriments des effluents varie grandement d'une source à l'autre et selon les pratiques agricoles. Il est bien connu que des aliments pour le bétail de mauvaise qualité produisent des effluents à faible teneur en nutriments. Les effluents doivent être analysés pour connaître leur teneur réelle en nutriments.

NUTRIMENT	RÉSIDUS DE CULTURE	FUMIER DE VOLAILLE	FUMIER DE BÉTAIL
N	10-15	25-30	20-30
P	1-2	20-25	4-10
K	10-15	11-20	15-20
Ca	2-5	40-45	5-20
Mg	1-3	6-8	3-4
S	1-2	5-15	4-50

Valeurs standard de la teneur en nutriments (g/kg) des résidus de culture et fumiers de volaille et de bétail (Adapté de Barker et al., 2000).

- **Les bio-solides** (solides résiduels provenant du traitement des eaux usées urbaines) peuvent être recyclés et fournir des quantités importantes de nutriments. Les nutriments contenus dans les bio-solides varient en quantité et en forme, selon la source, le traitement, le stockage et les processus de manutention. Leur teneur en nutriments et en contaminants éventuels devrait être régulièrement analysée.
- **La fixation biologique** de l'azote est la conversion des molécules inertes de dinitrogène (N_2) atmosphérique en formes d'azote qui peuvent être utilisées par les

plantes. La fixation biologique de l'azote existe dans plusieurs combinaisons culture-bactérie. Elle est la plus élevée dans les systèmes symbiotiques développés entre les légumineuses (par exemple les haricots, les pois, la luzerne) et les rhizobiums. Les taux de fixation biologique de l'azote vont de 20 à 400 kg N/ha/an selon les espèces végétales, la durée de la saison de croissance et les conditions climatiques.

- **Les engrais manufacturés** sont produits par l'industrie des engrais. Une large gamme de produits, fournissant un ou plusieurs nutriments minéraux essentiels, est à la disposition des agriculteurs. En moyenne, les agriculteurs du monde entier épandent environ 180 millions de tonnes d'engrais (sur une base nutriments) annuellement pour compléter les sources de nutriments disponibles à la ferme ou à proximité, et atteindre leurs objectifs de rendement durable et de qualité.

Les engrais contenant un seul macronutriment primaire sont appelés engrais « simples ». Ceux qui ont deux ou trois macronutriments primaires sont appelés engrais « composés ». Les engrais composés peuvent être soit des complexes (tous les nutriments dans le même granule) ou des engrais de mélange (mélange physique de différents granules). Chaque type d'engrais a ses propres avantages et inconvénients, qui dépendent des conditions agro-écologiques et économiques locales (pour plus de détails voir Reetz, 2016).

NOM COMMUN	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	ÉTAT PHYSIQUE
Ammoniac	82	0	0	0	Gazeux
Urée	45-46	0	0	0	Solide
Sulfate d'ammoniaque	21	0	0	24	Solide
Ammonitrate	33.0-34.5	0	0	0	Solide
Ammonitrate calcaire	20.4-27.0	0	0	0	Solide
Solution azotée	28-32	0	0	0	Liquide
Phosphate mono-ammonique	11	52	0	0	Solide
Phosphate di-ammonique	18	46	0	0	Solide
Nitrate de potassium	13	0	44	0	Solide
Phosphate naturel	0	20-40	0	0	Solide
Superphosphate simple	0	16-20	0	12	Solide
Superphosphate triple	0	46	0	0	Solide
Chlorure de potassium	0	0	60	0	Solide
Sulfate de potassium	0	0	50	18	Solide

Teneur moyenne en nutriments de quelques engrais importants (nutriments en % du produit).

Il est important de noter que les cultures répondent aux nutriments de toutes les sources, mais qu'elles ne peuvent absorber les nutriments que sous leur forme inorganique (minérale). Les sources organiques de nutriments doivent être minéralisées (transformées d'une forme organique en une

forme inorganique) avant d'être absorbées par les plantes. La quantité de nutriments fournie par les différentes sources fluctue beaucoup entre et au sein même des agro-écosystèmes. La nutrition durable des cultures identifie et utilise toutes les sources disponibles de nutriments.

FERTILISATION CARBONÉE

La photosynthèse, grâce à l'énergie lumineuse, combine le dioxyde de carbone (CO₂) et l'eau pour produire des glucides. Par le biais de ce processus, le CO₂ est la seule source de carbone pour toute la matière organique, dont environ la moitié est composée de carbone. Cette caractéristique qualifie le CO₂ comme l'élément le plus important de la vie en terme quantitatif mais, pour être efficace, la photosynthèse nécessite également tous les autres nutriments essentiels.

L'augmentation du CO₂ atmosphérique depuis le début de l'industrialisation, estimée entre 0,03% et 0,04%, a eu une importance majeure pour l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau et

pour l'amélioration des rendements des cultures. La valeur mondiale de la fertilisation par le CO₂ d'origine anthropique a été estimée à 140 milliards de dollars par an.

Dans les systèmes confinés tels que les serres modernes, l'augmentation de la concentration de CO₂ est une pratique courante pour augmenter le rendement. Cependant, pour éviter la dilution des autres nutriments dans le tissu végétal à croissance accélérée et la perte de valeur nutritive qui en résulterait, il est nécessaire de fournir tous les nutriments minéraux essentiels d'une manière équilibrée et en quantité suffisante.

1.3

POURQUOI LES ENGRAIS SONT-ILS NÉCESSAIRES POUR DES SOLS SAINS ET DES CULTURES PRODUCTIVES ET NOURRISSANTES ?

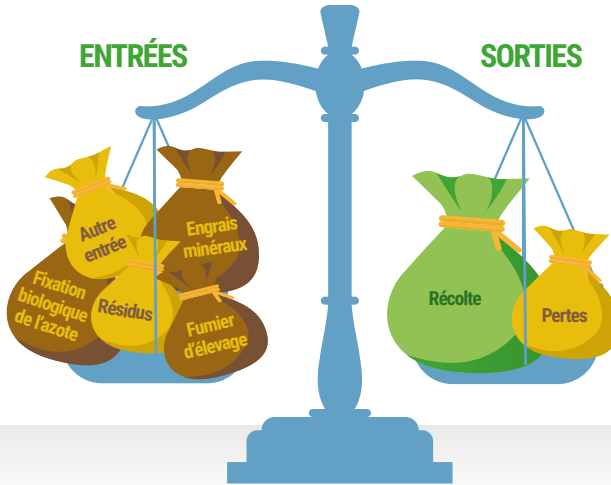
Les nutriments sont exportés du champ lorsque les cultures sont récoltées. C'est ce qu'on peut appeler l'épuisement nutritif du sol. La quantité de nutriments retirée par la récolte est propre à chaque culture, à la partie de la culture récoltée et est proportionnelle au rendement. Pour maintenir la fertilité du sol pour des cultures de qualité et des rendements durables, les nutriments exportés avec les récoltes et perdus dans l'environnement doivent être remplacés par des sources organiques et/ou minérales.

Dans les sols où la fertilité est en dessous de l'optimum et où cette pratique est économiquement viable, il peut être utile d'appliquer des quantités de nutriments plus élevées, en combinaison avec d'autres pratiques de gestion de la fertilité des sols, pour atténuer les facteurs nutritionnels limitants, et améliorer la disponibilité des nutriments aux cultures et la santé des sols.

Pour assurer des rendements moyens à élevés permettant d'améliorer durablement

la sécurité alimentaire et le revenu des agriculteurs, les nutriments provenant de sources indigènes, tels que les réserves du sol, la déposition atmosphérique, la fixation biologique de l'azote et le recyclage des effluents d'élevage peuvent ne pas être suffisants. Pour maintenir des rendements élevés, les agriculteurs ont généralement besoin d'apports supplémentaires en nutri-

ments sous forme d'engrais manufacturés ou de sources organiques de nutriments achetées. Les nutriments en quantité limitante seront apportés en appliquant des intrants minéraux et/ou organiques et, dans le cas des engrais manufacturés, en utilisant des engrais composés ou en combinant divers engrais complémentaires.



Les entrées et les sorties en nutriments doivent être équilibrées pour optimiser le rendement des cultures, maintenir la productivité et minimiser les pertes vers l'environnement.

Un bilan positif augmente le risque de pertes en nutriments et un bilan négatif entraîne un appauvrissement par extraction des nutriments du sol.

GÉRER LES ENGRAIS POUR AMÉLIORER LA VALEUR NUTRITIONNELLE

Les engrais peuvent également être gérés de manière à améliorer la valeur nutritionnelle des cultures et, de ce fait, améliorer la santé animale et humaine. Par exemple, la fertilisation azotée et soufrée influence la teneur en protéines et la qualité des protéines. La fertilisation potassique peut augmenter la concentration en antioxydants, et une fertilisation riche en zinc peut accroître la teneur en zinc du grain.

2.

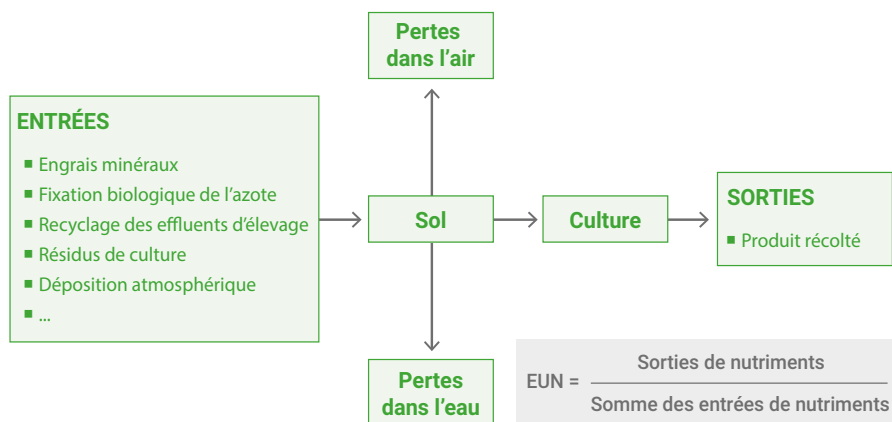
GÉRER LES NUTRIMENTS DE FAÇON EFFICIENTE ET EFFICACE

2.1

QU'EST-CE QUE L'EFFICIENCE DE L'UTILISATION DES NUTRIMENTS ?

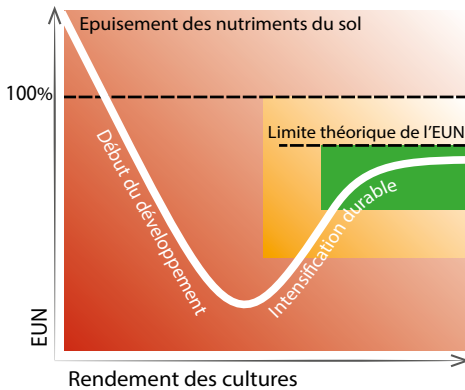
Du point de vue de l'agriculteur, l'efficacité de l'utilisation des nutriments peut être définie comme la proportion des nutriments appliqués (à partir de toutes les sources) qui est absorbée par la culture, c'est-à-dire comment tirer le meilleur parti

de l'apport en nutriments. A des fins de suivi, l'efficacité est calculée comme le rapport sorties/entrées, c'est-à-dire la proportion des nutriments appliqués qui finissent dans le produit récolté.



Calcul de l'Efficiency d'Utilisation des Nutriments (EUN)

Les faibles rapports sorties/entrées (par exemple inférieurs à 50%) reflètent souvent des risques de pertes d'éléments nutritifs vers l'environnement, tandis que des ratios élevés (par exemple supérieurs à 90%) peuvent refléter les pratiques d'épuisement du sol en nutriments, qui réduisent la fertilité des sols si pratiquées sur plusieurs années consécutives. Les deux cas ne sont pas durables. La « zone verte », où la productivité des cultures est élevée et où le ratio sorties/entrées est considéré comme proche de l'optimum, est spécifique à chaque système de culture et chaque nutriment.



Tendance type de l'évolution au cours du temps de l'Efficiencia d'Utilisation des Nutriments (EUN) par rapport au rendement des cultures.

Les systèmes agricoles passent progressivement de la zone rouge à la zone orange et, finalement, à la zone verte, qui reflète un rendement élevé et une efficacité optimale de l'utilisation de l'azote.

(Adapté de Zhang et al., 2015)

L'efficiencia de l'utilisation des nutriments est fortement influencée par la façon dont les engrais minéraux, les autres sources de nutriments, les cultures et les sols sont gérés. L'efficiencia de l'utilisation des nutriments s'améliore depuis environ trois décennies dans les pays développés, où les agriculteurs ont accès aux technologies modernes et à l'information. Elle illustre le passage à l'intensification durable, où les agriculteurs augmentent la productivité agricole tout en préservant les ressources et en réduisant les risques d'impacts environnementaux associés à l'excédent de nutriments par unité de production. En revanche, la situation continue de se détériorer dans la plupart des pays en développement. L'accès aux meilleures pratiques de gestion (gestion responsable des nutriments et approches intégrées) et leur adoption sont nécessaires pour inverser la tendance dans les pays en développement.

Comme les nutriments interagissent les uns avec les autres, une meilleure efficacité d'utilisation des nutriments peut être obtenue en gérant mieux les nutriments en question, ainsi qu'en gérant mieux les nutriments avec lesquels ils interagissent (par une fertilisation équilibrée). Par exemple, le soufre est connu pour améliorer la synthèse des protéines et ainsi l'efficiencia d'utilisation de l'azote.

LES OBJECTIFS D'EFFICIENCE ET D'EFFICACITÉ SONT COMPLÉMENTAIRES

Si l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation des nutriments est un objectif important, elle ne doit pas se faire au détriment des autres domaines clés de performance tels que le rendement des cultures¹, la fertilité du sol, la productivité de l'eau, etc., qui reflètent l'efficacité du système agricole. Par exemple, il est possible d'augmenter l'efficacité d'utilisation des nutriments en extrayant les réserves de nutriments du sol, mais c'est une option non durable car une telle pratique impacterait la fertilité du sol à moyen et long terme.

De même, il est possible d'atteindre une efficacité d'utilisation plus élevée

en réduisant les doses d'application d'engrais, mais ça pourrait être au détriment du rendement des cultures. Si le suivi de l'efficacité d'utilisation des nutriments fournit des informations utiles, il devrait faire partie d'un ensemble d'indicateurs complémentaires pour assurer une bonne interprétation.

Les bonnes pratiques d'utilisation recommandées aux agriculteurs, spécifiques à leur lieu et leurs cultures, devraient offrir des options qui améliorent la performance globale et la durabilité du système agricole, en tenant compte des objectifs économiques, sociaux et environnementaux fixés par la société.

¹ L'efficacité de l'utilisation des nutriments (mesurée comme le rapport sorties/entrées) est typiquement plus élevée à des doses d'application de nutriments très faibles, ce qui conduit à des rendements faibles.



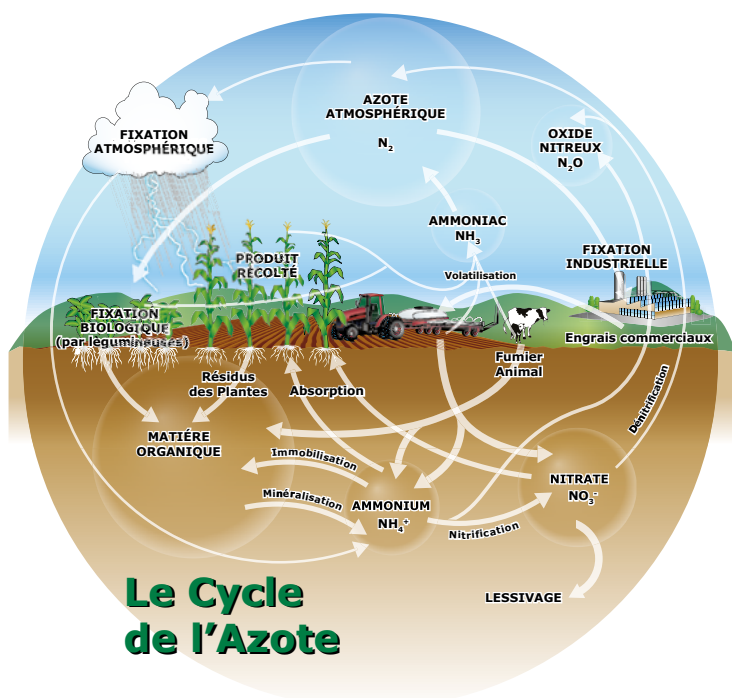


3.

CYCLES AGRICOLES DES NUTRIMENTS ET VOIES DE PERTE

Les principales formes d'azote dans le sol sont les composés azotés organiques et l'azote minéral sous forme ammoniacale (NH_4^+) et nitrique (NO_3^-). L'azote minéral représente une petite fraction seulement de l'azote total dans le sol. La majorité de

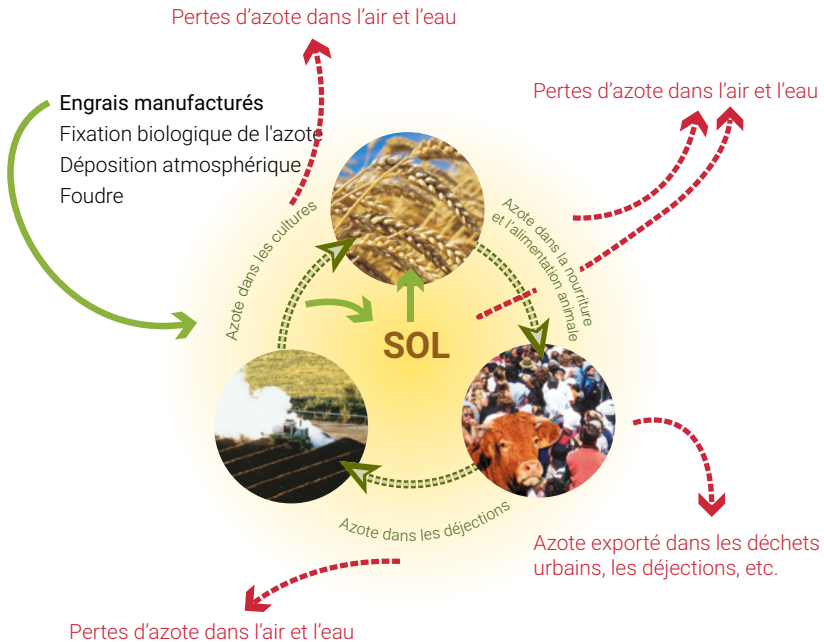
l'azote dans la partie superficielle du sol est présente sous forme organique. Ces différentes fractions azotées subissent divers processus de transformation, qui peuvent entraîner diverses pertes dans l'air et dans l'eau.



Dans le cas du phosphore, les principales pertes se produisent par l'érosion du sol et le ruissellement des particules. Les pertes par lessivage du phosphore sont faibles par rapport à celles de l'azote en raison de la faible mobilité du phosphore dans les sols. Le potassium est également perdu par érosion, ruissellement et lessivage. Les pertes par lessivage sont plus importantes pour le potassium que pour le phosphore, en raison de la plus grande mobilité du potassium dans les sols. Le cycle du soufre est plus complexe avec, comme pour l'azote, des pertes à la fois dans l'air et l'eau.

Comme les cycles agricoles des nutriments ne sont pas clos, la production agricole

durable repose sur des apports de nutriments externes, par l'ajout de matières organiques (si disponibles) et d'engrais minéraux et la fixation biologique de l'azote, afin de compenser les exportations de nutriments par les produits récoltés et les pertes de nutriments à différents stades du cycle. Le défi permanent pour l'agriculteur est d'appliquer la bonne source de nutriments, à la bonne dose, au bon moment et au bon endroit, afin de maintenir des rendements optimaux et, en même temps, de minimiser les impacts environnementaux. Le manque et l'excès de nutriments peuvent avoir des effets néfastes sur la santé humaine, l'environnement et le revenu des agriculteurs.



Le cycle agricole de l'azote : un système ouvert avec des pertes inévitables

4.

NÉCESSITÉ D'UNE GESTION RAISONNÉE DES NUTRIMENTS ET DE LA FERTILITÉ DU SOL

4.1

LES SOURCES MINÉRALES ET ORGANIQUES SONT COMPLÉMENTAIRES

Les engrais minéraux ont une teneur en nutriments plus élevée que les sources organiques. Ils ont une composition nutritive bien définie et les nutriments contenus dans les engrais minéraux sont souvent facilement disponibles pour les cultures. Les sources de nutriments organiques sont, par définition, riches en matière organique,

ce qui contribue à améliorer les propriétés du sol telles que la structure, l'infiltration de l'eau et la capacité de rétention en eau. Compte tenu de ces avantages respectifs, les sources minérales et organiques de nutriments sont complémentaires. Les bonnes pratiques de fertilisation tirent parti de cette synergie.

4.2

BÉNÉFICES MULTIPLES DES APPROCHES DE GESTION RAISONNÉE DE LA NUTRITION DES PLANTES ET DE LA FERTILITÉ DU SOL

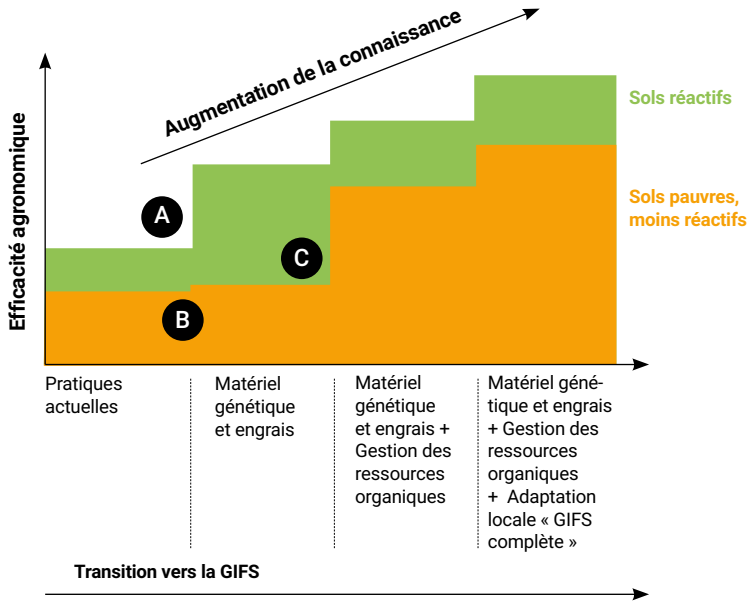
Du point de vue des nutriments, la gestion raisonnée peut être envisagée à deux niveaux différents :

l'agriculteur et restaurer la fertilité des sols lorsque les analyses de sol révèlent de faibles niveaux de nutriments disponibles.

- La Gestion Raisonnée des Nutriments (GRN) vise à combiner les sources organiques et minérales de nutriments, en s'appuyant sur les avantages respectifs des deux sources. Dans la GRN, les agriculteurs utilisent des sources organiques disponibles à la ferme ou à proximité et les complètent avec des engrais manufacturés pour atteindre les objectifs de rendement et de qualité de
- Alors que la GRN est une approche centrée sur les aspects liés aux apports en nutriments dans la production végétale, la Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols (GIFS) englobe tous les aspects relatifs à l'absorption des nutriments par les plantes, y compris la sélection des variétés et les dimensions biologiques et physiques de la santé du sol, qui peuvent améliorer l'absorption.

Par exemple, dans des conditions de stress hydrique, un sol recouvert de matière organique peut avoir une humidité supérieure à celle d'un sol qui n'a pas de paillage, et cette humidité supplémentaire peut entraîner une meilleure absorption des nutriments apportés par les engrais et ainsi des rendements plus élevés.

La GRN et la GIFS partagent des objectifs similaires, à savoir assurer une absorption efficace des nutriments et une croissance des plantes avec un minimum d'impacts négatifs sur l'environnement.



- A** L'adaptation locale s'ajuste également en fonction de la variabilité de l'état de fertilité du sol et considère que des améliorations substantielles de l'efficacité agronomique peuvent être attendues sur des sols réactifs.
- B** Sur les sols pauvres et moins réactifs, l'application seule d'engrais n'améliore pas l'efficacité agronomique.
- C** L'engrais est mieux appliqué en association avec des matières organiques.

Relation conceptuelle entre l'efficacité agronomique des engrais et des matières organiques au fur et à mesure que l'on passe de la pratique actuelle à la « GIFS complète ». À dose d'application d'engrais constante, le rendement est lié linéairement à l'efficacité agronomique. Notez que le graphique ne suggère pas la nécessité d'utiliser les composants dans l'ordre présenté

5.

GESTION RESPONSABLE DES NUTRIMENTS

5.1

PRINCIPES DE BONNES PRATIQUES D'UTILISATION ET DE GESTION RESPONSABLE DES NUTRIMENTS

Les pratiques démontrées par la recherche et l'expérience pour être plus productives, plus rentables, plus respectueuses de l'environnement et plus socialement acceptables sont désignées comme bonnes pratiques d'utilisation (BPU) des engrais (ou des nutriments). L'objectif des BPU des engrais est de faire correspondre l'apport en nutriments aux besoins des cultures afin d'optimiser le rendement tout

en minimisant les pertes de nutriments dans l'environnement. L'application des BPU dans chacun des quatre domaines de gestion des nutriments (source, quantité, moment et placement) constitue la base de la « gestion responsable des nutriments », un cadre pour l'utilisation efficace et efficace des nutriments afin d'obtenir des avantages économiques, sociaux et environnementaux.



Une BPU individuelle peut améliorer la performance dans un ou deux domaines de gestion. Étant donné que les quatre domaines de gestion doivent recevoir une attention égale, la gestion responsable des

nutriments exige l'adoption d'un ensemble de BPU complémentaires qui couvriront les quatre domaines. Si l'un des quatre domaines est négligé, il est peu probable que la gestion des nutriments à la ferme soit

efficace et efficace. Le domaine de gestion le plus faible aura la plus forte influence sur la performance globale d'utilisation.

Le choix des BPU varie selon le lieu. Les meilleures pour une ferme donnée sont celles adaptées aux conditions pédoclimatiques locales, au type de culture, au système de gestion et autres facteurs propres au site.

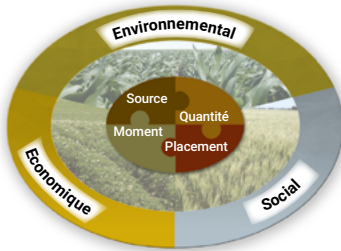


Diagramme représentant le Cadre global de la Gestion responsable des nutriments 4B. Le concept est centré sur l'imbrication des 4B, qui influencent la contribution des systèmes culturaux aux trois dimensions de la durabilité (IFA, 2009, IPNI, 2012)

Les principes scientifiques généraux suivants s'appliquent aux BPU des engrais :

› **Être cohérent avec les principes agronomiques reconnus.**

Tenir compte des disciplines scientifiques connexes, notamment la fertilité des sols, la nutrition des plantes, la physique et la chimie des sols, l'hydrologie et l'agrométéorologie. Par exemple, le stress hydrique et, par conséquent, le flétrissement peuvent s'aggraver par temps sec, car la concentration en nutriments autour de la zone racinaire extrait de l'eau de la plante par osmose. Dans ce cas, l'application d'engrais doit être faite au

moment opportun selon la disponibilité en eau ou l'humidité du sol.

› **Reconnaître les interactions avec les autres facteurs du système de culture.**

Les exemples incluent la variété, la date de plantation/semis, la densité de peuplement, la rotation des cultures, etc.

› **Reconnaître les interactions entre la source de nutriments, leur dose d'application, la période d'application et leur placement.**

Par exemple, une source à libération contrôlée ne devrait probablement pas être appliquée avec le même calendrier qu'une source soluble.

› **Éviter les effets néfastes sur les racines, les feuilles et les plantules.**

Par exemple, les engrais placés en bande doivent être contenus à distance des semences pour éviter tout risque d'endommager les plantules.

› **Reconnaître les effets sur la qualité de la récolte ainsi que sur le rendement.**

Par exemple, l'azote influe à la fois sur le rendement et la teneur en protéines. Les protéines sont un élément important de la nutrition humaine et animale et elles jouent sur la qualité de la panification du blé. Des doses d'azote supérieures à celles requises pour obtenir un rendement optimal peuvent augmenter la teneur en protéines, mais une application excessive a un impact négatif sur la santé des plantes, le rendement et la qualité des cultures, et la durabilité de l'environnement. Il convient de faire particulièrement attention à l'utilisation de l'azote sur les variétés efficaces à l'égard de l'azote : certaines variétés poussant dans un milieu trop

riche en azote ont tendance à se développer de façon excessive, c'est-à-dire à avoir une trop grande partie végétative au détriment

de la partie récoltable. C'est pourquoi, un choix approprié des variétés et des programmes adaptés de fertilisation sont essentiels.

5.2

LA BONNE SOURCE DE NUTRIMENTS

CHOISIR DES SOURCES QUI FOURNISSENT UN APPORT ÉQUILIBRÉ EN NUTRIMENTS ESSENTIELS, ET DONT LA LIBÉRATION CORRESPONDENT À LA DEMANDE DES CULTURES

Dans le cadre d'un système de gestion des nutriments, la bonne source doit garantir qu'un apport équilibré de tous les nutriments essentiels soit présent dans des formes disponibles pour les plantes, tout au long de la saison de croissance de la culture. Le choix de la bonne source (y compris les sources organiques) doit également tenir compte de la sensibilité à la perte de nutriments, des interactions ou des problèmes de compatibilité, de la sensibilité potentielle des cultures à la source de nutriments et des risques associés aux éléments non nutritifs contenus dans le matériel d'origine. La bonne source peut varier en fonction de la culture, du climat, des propriétés du sol, des produits disponibles, des considérations économiques et des options choisies pour la méthode d'application.

Les principes scientifiques qui s'appliquent à la bonne source de nutriments comprennent :

› Fournir les nutriments dans des formes disponibles pour les plantes.

Le nutriment appliqué est soluble dans l'eau et disponible pour les plantes ou se présente sous une forme qui se transforme facile-

ment en une forme disponible dans le sol.

› Convenir aux propriétés physiques et chimiques du sol.

Par exemple, éviter l'application de nitrate sur des sols gorgés d'eau et l'application en surface d'urée sans inhibiteur d'uréase sur des sols à pH élevé. Certains engrais ont des effets acidifiants sur les sols ; ils ne devraient être appliqués que sur des sols alcalins ou en association avec un chaulage.

› Reconnaître les interactions entre les nutriments et les sources.

Par exemple, l'interaction (antagonisme) phosphore-zinc, l'augmentation de la disponibilité du phosphore par l'azote et l'apport d'engrais complémentaire au fumier.

› Reconnaître la compatibilité du mélange.

Certaines combinaisons de sources/produits attirent l'humidité lorsqu'ils sont mélangés, ce qui limite l'uniformité de l'épandage du matériau mélangé ; la taille des granules devrait être similaire pour éviter la ségrégation du produit ; certaines sources liquides peuvent « cristalliser » à basse température ou réagir avec d'autres composants pour former des gels ou précipiter.

› **Reconnaître les sensibilités des cultures aux éléments associés.**

La plupart des nutriments ont un ion accompagnateur qui peut avoir un effet bénéfique, neutre ou nuisible pour certaines cultures. Par exemple, le chlorure qui accompagne le potassium dans le chlorure de potasse est bénéfique pour le maïs mais peut nuire à la qualité de certains fruits et légumes.

› **Contrôler les effets des éléments non nutritifs.**

Par exemple, les matières premières utilisées pour la production d'engrais peuvent contenir des éléments traces non nutritifs. L'ajout de ces éléments devrait être maintenu dans des limites sûres..

5.3

LA BONNE QUANTITÉ

S'ASSURER QU'UNE QUANTITÉ ADÉQUATE DE TOUS LES NUTRIMENTS LIMITANTS EST APPLIQUÉE POUR RÉPONDRE AUX BESOINS DES CULTURES EN FONCTION DES OBJECTIFS DE RENDEMENT ET DE QUALITÉ

La bonne quantité correspond à l'apport de nutriments disponibles, provenant de toutes les sources, permettant de répondre aux besoins nutritifs de la plante. Comprendre les besoins nutritionnels de la culture au long de son cycle de croissance est une première étape pour définir la bonne quantité. La dose d'application doit être choisie de façon à équilibrer l'apport en nutriments et la demande de la culture tout au long de sa croissance afin d'éviter une carence ou un excès en nutriments. Le rendement et la qualité des cultures sont limités si la dose est trop faible alors qu'une application excessive peut entraîner des dommages aux cultures et avoir des effets négatifs sur l'environnement. L'application excessive ou insuffisante de nutriments diminue la rentabilité économique.

› **Évaluer l'apport en nutriments du sol.**

Les pratiques utilisées peuvent compren-

dre l'analyse du sol et des plantes, des expérimentations de réponse à la fertilisation, des parcelles témoin sans engrais ou des bandes de référence sur-fertilisées.

› **Évaluer toutes les sources de nutriments disponibles.**

Cela comprend la quantité et la disponibilité des nutriments dans les résidus de récolte, les engrais verts, le fumier animal, les composts, les résidus solides issus du traitement des eaux, l'eau d'irrigation, la déposition atmosphérique et les engrais manufacturés.

› **Évaluer la demande de la plante.**

La quantité de nutriments absorbée en une saison dépend du rendement de la culture et de sa teneur en nutriments. Il est important de faire une évaluation précise de l'objectif de rendement et de concevoir des programmes de production agricole raisonnée pour atteindre un rendement réaliste.

› **Prédire l'efficacité d'utilisation des engrais.**

Certaines pertes sont inévitables. Tandis que les pertes devraient être minimisées, les pertes inévitables doivent être prises en compte lors de la détermination de la dose pour satisfaire les besoins de la plante.

› **Tenir compte de la variabilité de la demande en nutriments d'une saison à l'autre.**

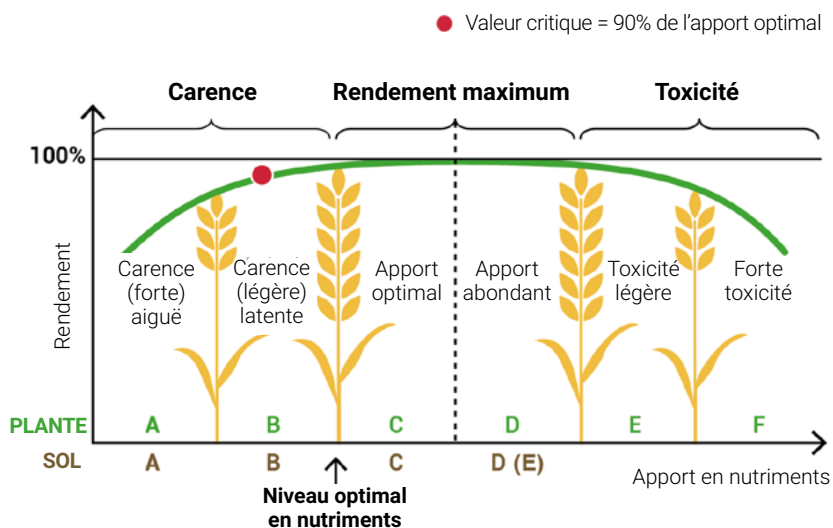
Le potentiel de rendement et la demande en nutriments sont influencés par la variabilité saisonnière du climat et d'autres facteurs, y compris la conduite culturale, offrant des possibilités de pilotage des nutriments en temps réel avec des doses d'application d'engrais variables (chlorophyllomètre, grille de couleur des feuilles, et autres méthodes d'évaluation des nutriments au champ).

› **Considérer les bilans de nutriments.**

Si les sorties de nutriments d'un système de culture dépassent les entrées, la fertilité du sol diminue à long terme. A l'opposé, si les excédents de nutriments sont perdus, la qualité de l'environnement et la performance économique sont affectées.

› **Considérer les aspects économiques relatifs à la dose.**

En tenant compte de la variabilité spatiale et temporelle du rendement, pour les nutriments peu susceptibles d'être retenus dans le sol, la dose d'application la plus économique est celle où la dernière unité de nutriment appliquée est égale à l'augmentation du rendement qu'elle est censée apporter (loi des rendements décroissants). La valeur résiduelle des nutriments du sol pour les cultures futures devrait être prise en compte.



Effets de la dose en nutriments sur le rendement des cultures, montrant le risque de carence et toxicité potentielles lié à l'application de la mauvaise dose.

LE BON MOMENT

APPLIQUER LES NUTRIMENTS DANS LE TEMPS EN FONCTION DES INTERACTIONS ENTRE L'ABSORPTION DES CULTURES, LES APPORTS DU SOL, LES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX ET LA LOGISTIQUE DES OPÉRATIONS AU CHAMP

La vitesse d'absorption des nutriments par les cultures change tout au long du cycle de croissance, de l'émergence à la maturité en passant par la croissance végétative et les stades de reproduction. Pour atteindre une productivité optimale, une quantité suffisante de nutriments doit être présente et accessible à la plante pour répondre à ses besoins à tous les stades de son cycle de développement. Cependant, si un nutriment est présent dans le sol pendant une période prolongée avant son absorption par la culture, il peut sortir de la zone d'exploration racinaire ou être converti en formes indisponibles. L'application des nutriments au bon moment favorise le rendement des cultures et leur qualité nutritionnelle et minimise les pertes de nutriments.

› Évaluer le moment de l'absorption par la culture.

Le moment dépend de facteurs tels que la date de plantation/semis, les caractéristiques de croissance des plantes, la sensibilité aux carences à des stades de croissance particuliers. L'apport en nutriments doit être synchronisé avec les besoins en nutriments de la culture, lesquels suivent généralement une courbe en S.

› Évaluer la dynamique de l'apport en nutriments du sol.

La minéralisation de la matière organique du

sol fournit une quantité importante de certains nutriments, mais si l'absorption de la culture précède leur libération par minéralisation, des carences peuvent alors limiter la productivité.

› Évaluer la libération des nutriments des engrais et leur disponibilité.

La vitesse de libération des nutriments provenant des engrais et leur disponibilité sont influencées par les conditions météorologiques et d'humidité du sol lors de l'application, ce qui peut entraîner des pertes importantes de nutriments et de rendement si elles ne sont pas synchronisées avec les besoins de la culture.

› Reconnaître le moment où les facteurs météorologiques influencent les pertes de nutriments.

Certaines formes spécifiques d'un nutriment peuvent donner de meilleurs résultats que d'autres sous certaines conditions climatiques et à certaines saisons. Par exemple, dans les régions tempérées, les pertes par lessivage ont tendance à être plus fréquentes en hiver.

› Évaluer les aspects logistiques des opérations au champ.

Par exemple, des applications multiples de nutriments peuvent se combiner, ou non, avec celles de produits phytosanitaires. Les applications de nutriments ne doivent pas

retarder les opérations tributaires du facteur temps comme les semis/plantations ou la nécessité de lutter contre les insectes ou les

maladies. Dans ce dernier cas, des engrais foliaires compatibles avec la plupart des produits phytosanitaires peuvent être utilisés.

5.5

LE BON PLACEMENT

PLACER LES NUTRIMENTS POUR PROFITER DE LA DYNAMIQUE SOL-RACINES, EN CONSIDÉRANT LES MOUVEMENTS DES NUTRIMENTS, LA VARIABILITÉ SPATIALE DANS LE CHAMP ET LE POTENTIEL DE LIMITATION DES PERTES DE NUTRIMENTS DU CHAMP

Avoir les nutriments au bon endroit - verticalement et spatialement – assure que les racines des plantes peuvent absorber suffisamment de chaque nutriment, à tout moment durant le cycle de croissance. Des systèmes de localisation peuvent être utilisés pour positionner l'engrais par rapport aux racines en croissance. Ces dernières années, les techniques de l'agriculture de précision ont permis d'affiner l'application des nutriments, en faisant varier la dose d'application au sein de la parcelle, afin de tenir compte de la variabilité de la fertilité du sol et du potentiel de rendement.

› Reconnaître la dynamique sol-racine.

Les racines des cultures annuelles explorent le sol progressivement au cours de la saison. La localisation doit garantir que les nutriments sont bien interceptés en fonction des besoins. Un exemple est la localisation des engrais phosphatés pour le maïs, assurant une nutrition suffisante des jeunes plantules et augmentant considérablement les rendements, même si les quantités appliquées et absorbées sont faibles.

› Gérer la variabilité spatiale du sol au sein de la parcelle et entre exploitations.

Les sols affectent le potentiel de rendement des cultures et varient en capacité de fourniture de nutriments ou de potentiel de perte de nutriments.

› S'adapter aux besoins du système de travail du sol.

Reconnaître les aspects logistiques de la préparation du sol. En agriculture de conservation, s'assurer que les applications sous la surface maintiennent la couverture du sol par les résidus de culture et ne compromettent pas la qualité du lit de semences.

› Limiter les pertes potentielles hors champ de nutriments.

Identifier les parcelles et les zones les plus sujettes aux pertes de nutriments. Maintenir les pertes de nutriments par érosion, ruissellement, lessivage, volatilisation, nitrification et dénitrification dans des limites acceptables.

› Réduire le risque de toxicité des nutriments sur les plantules.

Éviter la toxicité sur les semis par une concentration excessive de nutriments trop près de la graine.

› **Corriger les carences aiguës par des applications foliaires.**

Pendant les périodes de sécheresse ou de croissance maximale, des applications foliaires peuvent remédier aux carences

temporaires en magnésium ou en soufre. Les besoins en oligo-éléments des cultures peuvent être entièrement satisfaits par des applications foliaires, par exemple dans le cas du zinc, du bore ou du manganèse.



6.

GESTION DES NUTRIMENTS EN FONCTION DES PRINCIPALES CONSIDÉRATIONS DE DEVELOPPEMENT DURABLE

6.1

GESTION DES NUTRIMENTS ET SÉCURITÉ ALIMENTAIRE ET NUTRITIONNELLE

Les nutriments, lorsqu'ils sont disponibles en quantités insuffisantes, limitent le rendement des cultures. Pour produire suffisamment afin de répondre aux besoins croissants en alimentation humaine, alimentation animale, fibres et bioénergie d'une population mondiale en croissance rapide et plus riche, tout en réduisant l'empreinte de l'agriculture sur l'environnement, il est essentiel d'améliorer la gestion des nutriments. L'azote est le nutriment le plus limitant dans le monde. En l'absence d'engrais, en particulier d'engrais azotés, il est estimé que nous ne pourrions produire que la moitié de la production alimentaire mondiale actuelle (Erismann et al., 2008). Avec une population mondiale estimée à plus de 9 milliards d'ici 2050, couplée à un changement constant vers davantage de produits d'origine animale dans les régimes alimentaires, l'utilisation efficiente et efficace des engrais jouera un rôle clé pour nourrir la

planète dans les décennies à venir. Cela comprend une fertilisation plus équilibrée, comprenant l'utilisation appropriée des macronutriments secondaires et des oligo-éléments.

Plus récemment, la fertilisation a été utilisée pour remédier aux carences en oligo-éléments chez les animaux et chez les humains. En ce qui concerne le zinc (Zn), la proportion de personnes exposées au risque de malnutrition en Zn, bien que variable régionalement, est estimée à 21% au niveau mondial (Hotz et Brown, 2004). Là où les faibles niveaux de zinc dans les sols sont à l'origine de carences chez l'homme, la fertilisation offre un choix intéressant pour augmenter, à la fois, le rendement des cultures et la concentration en Zn dans le grain, améliorant ainsi l'apport en zinc des populations qui cultivent ces sols (Détails sur www.harvestzinc.org).

GESTION DES NUTRIMENTS ET SANTÉ DU SOL

De nombreux facteurs contribuent à la qualité ou à la santé du sol. Une propriété clé de la santé du sol est sa capacité à fournir tous les nutriments essentiels dans des quantités et des proportions adéquates pour la croissance des plantes ; c'est souvent défini comme la fertilité du sol. La fertilité du sol est maintenue en ajoutant des nutriments qui compensent les exportations et les pertes. Des facteurs physiques tels que la texture et la structure sont également des éléments importants de la qualité du sol. Alors que les interventions humaines peuvent modifier la structure du sol, la texture est en grande partie immuable. Le facteur clé de la qualité du sol est la fraction de la matière organique du sol (MOS), qui, bien que relativement faible, a une forte influence sur la structure du sol, sur sa bonne santé générale et sur ses fonctions bénéfiques.

La MOS joue sur les populations microbiennes du sol et sur leurs nombreuses fonctions dans le sol telles que la décomposition de la matière organique et le cycle des nutriments. La matière organique peut aider à augmenter la stabilité des agrégats du sol et contribuer ainsi à améliorer l'infiltration et la rétention de l'eau, permettant une meilleure résistance à l'érosion et à la dégradation du sol.

L'utilisation d'engrais peut avoir des effets positifs sur la santé du sol si les bonnes pratiques agricoles sont mises en œuvre,

tandis que la mauvaise utilisation des engrais peut avoir un impact négatif sur certaines propriétés du sol. En fonction du système de travail du sol utilisé, des ajouts réguliers d'engrais peuvent améliorer les niveaux de MOS en stimulant la production de racines et de résidus de cultures. Il y a un débat concernant l'impact des engrais minéraux sur la MOS en conditions agro-écologiques tropicales, et si les engrais minéraux pourraient stimuler le renouvellement de la matière organique et ainsi entraîner une décomposition plus rapide de la MOS. Cependant, l'analyse d'expérimentations à long terme menées dans le monde entier montre qu'une utilisation adéquate et équilibrée des engrais minéraux entraîne une augmentation de la MOS par rapport aux parcelles ne recevant pas d'engrais.

Si un engrais ou un engrais de mélange inadapté est utilisé, par exemple, en appliquant un mauvais équilibre entre l'azote et les autres nutriments essentiels, il peut nuire à la santé du sol en accélérant l'épuisement des nutriments non ajoutés. Avec certains engrais, il existe également un risque d'acidification des sols. Ca peut être bénéfique pour les sols alcalins ou calcaires, mais peut être préjudiciable aux sols à pH bas si aucun amendement n'est appliqué pour compenser l'effet acidifiant.

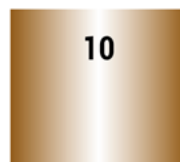
Pourcentage d'augmentation du carbone organique dans le sol dû à l'application d'engrais comparé au témoin non fertilisé.



104 expérimentations de longue durée
(6-158 ans)
(Ladha et al., 2011)



64 expérimentations de longue durée
(riz hors basses terres, 5-130 ans)
(Geiseller et Scow, 2014)



20 expérimentations de longue durée
(Europe, 16-108 ans)
(Körschens et al., 2013)

Les effets des engrais sur les populations microbiennes du sol dépendent de la source de nutriment, de la dose et de la méthode d'application, du pH du sol et de l'intervalle de temps envisagé. Les effets négatifs sont souvent localisés et de courte durée. Par exemple, à côté des granules d'engrais, l'activité microbienne peut être réduite pendant quelques semaines, après quoi les niveaux reviennent à la normale.

Des expérimentations de longue durée montrent que l'utilisation à long terme d'engrais conduit généralement à une augmentation de la biomasse microbienne du sol (avec un éventuel changement de la diversité microbienne) et l'activité microbienne est généralement renforcée par l'utilisation intégrée d'amendements organiques et d'engrais minéraux.

	NOMBRE DE SÉRIES DE DONNÉES	CARBONE DE LA BIOMASSE MICROBIENNE DU SOL (mg kg ⁻¹)	
		-N	+N
Toutes les données	107	238	268
pH <5 dans les traitements avec N	17	240	213
pH 5 à 7 dans les traitements avec N	39	234	253
pH 7 dans les traitements avec N	17	139	205
Durée des expérimentations à long terme : 5 – 10 ans	18	300	239
Durée des expérimentations à long terme : 10 – 20 ans	34	227	270
Durée des expérimentations à long terme : 20 ans et plus	55	224	276

Biomasse microbienne du sol dans les traitements avec (+ N) et sans (-N) fertilisation azotée.

Les moyennes non pondérées sont basées sur l'analyse de 107 séries de données issues de 64 expérimentations de longue durée sur riz hors basses terres dans le monde (adapté de Geiseller et Scow, 2014).

INTERACTIONS EAU x NUTRIMENTS

Les bonnes pratiques d'utilisation des engrais peuvent améliorer la productivité de l'eau, tout comme un apport adéquat en eau est nécessaire pour améliorer l'efficacité d'utilisation des nutriments. Souvent, la gestion de l'eau et celle des nutriments sont traitées séparément, alors qu'elles sont intimement liées. L'amélioration de l'efficacité d'utilisation des nutriments ne devrait pas être considérée uniquement comme un problème de gestion des engrais. La même chose est vraie pour l'eau.

Le stress hydrique entrave le transport des nutriments du sol vers les racines, ainsi que les processus chimiques et biologiques dans les sols nécessaires pour une absorption optimale des nutriments par les plantes. Les carences en nutriments réduisent le développement

racinaire et, en conséquence, la capacité des cultures à utiliser l'eau de façon efficace. L'amélioration des pratiques agronomiques est essentielle pour accroître la production agricole par unité de surface, et par unité d'eau et de nutriments consommés. Elle contribue ainsi à une intensification agricole durable.

L'influence des nutriments sur le rendement dépend de l'eau disponible. Il existe souvent une interaction positive entre ces deux composantes et leur importance relative varie en fonction du degré de stress imposé par chaque facteur. Souvent, les interactions entre les nutriments et l'eau ont un impact plus important sur le rendement que l'impact de chaque facteur pris séparément. Par conséquent, ces deux facteurs devraient être traités de façon conjointe.



GESTION DES NUTRIMENTS ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

En gérant les nutriments de façon efficiente et efficace, les agriculteurs peuvent :

- améliorer l'adaptation au changement climatique ;
- empêcher l'expansion de cultures vers des habitats sensibles et précieux ;
- réduire l'intensité d'émission du protoxyde d'azote (N_2O) ; et
- séquestrer le carbone (C) dans leurs sols.

L'expansion des terres agricoles vers les forêts, les pâturages ou les zones humides libère des quantités importantes de dioxyde de carbone (CO_2). Les émissions importantes de CO_2 sont dues à la combustion de buissons défrichés et à la destruction des puits de carbone. En augmentant les

rendements, les engrais ont la possibilité d'empêcher l'expansion de la culture dans les zones sensibles et les émissions de gaz à effet de serre ainsi que les pertes de biodiversité associées.

Lorsqu'un engrais azoté est appliqué, une partie est absorbée par les cultures, une autre reste dans le sol (dont une fraction est incorporée dans la matière organique du sol) et une dernière est perdue dans l'environnement. L'une des voies de perte est la dénitrification, qui libère du diazote (N_2) et du protoxyde d'azote (N_2O). Ce dernier est un gaz à effet de serre avec un potentiel de réchauffement climatique environ 300 fois supérieur à celui du CO_2 .

ÉMISSIONS DE N_2O PROVENANT D'ÉCOSYSTÈMES CONTRÔLÉS ET APPORTS D'AZOTE

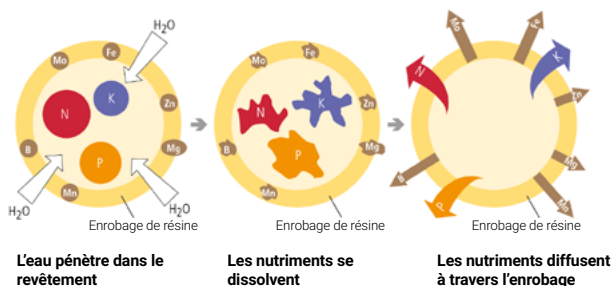
La méthode de niveau 1 du Groupement d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) pour calculer les émissions directes de N_2O provenant de sols cultivés, suppose que 1% de l'azote ajouté (organique ou inorganique) est perdu dans l'environnement sous forme de N_2O . Même si cette méthode est plutôt une simplification de la réalité, elle repose sur des ensembles de données étendus, qui relient les émissions mesurées de N_2O aux apports d'azote. Il semble donc difficile de réduire les émissions totales de N_2O si les systèmes agricoles doivent être (davantage) intensifiés.

Certaines bonnes pratiques agricoles (par exemple, éviter les applications d'azote sur les sols détrempés, utiliser des engrais à libération lente ou contrôlée ou des engrais

stabilisés avec des inhibiteurs de nitrification) peuvent réduire les pertes d'azote sous forme de N_2O tout en améliorant l'efficacité et l'efficacité de l'azote.

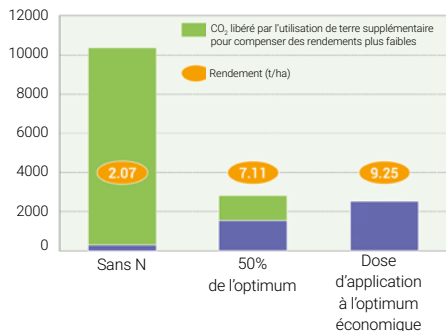
ENGRAIS À LIBÉRATION LENTE ET CONTRÔLÉE ET ENGRAIS STABILISÉS

Plusieurs additifs et traitements sont commercialisés pour modifier la disponibilité des nutriments. Ceux-ci comprennent les « engrais à libération lente » qui se décomposent graduellement pour libérer les nutriments disponibles pour les plantes (ex. méthylène urée), les « engrais à libération contrôlée » qui sont physiquement encapsulés dans un revêtement protecteur (ex. engrais enrobés d'un polymère) et les « engrais stabilisés » qui ralentissent le cycle de l'azote dans le sol (ex. engrais traités avec des inhibiteurs d'uréase et/ou de nitrification). Tous ces produits visent à prolonger la libération des nutriments des engrais afin de mieux répondre aux besoins des cultures.



Mode d'action d'un engrais enrobé/encapsulé à libération contrôlée

En outre, il est possible de réduire les intensités d'émission, c'est-à-dire les émissions totales de gaz à effet de serre (en équivalent CO_2) par tonne de produit récolté. Même si les quantités de N_2O émises augmentent, cette augmentation peut être plus faible que l'augmentation correspondante de la production végétale ce qui, en divisant l'une par l'autre, réduit les intensités d'émission. En combinant une réduction des intensités d'émission avec une expansion nulle ou limitée des systèmes de culture, les futurs aliments peuvent être produits avec des émissions de gaz à effet de serre comparativement moins importantes.



Émissions de gaz à effet de serre ($kg\ CO_2\ eq/ha$) pour la production de 9,25 tonnes de blé d'hiver au Royaume-Uni sous trois régimes différents de fertilisation azotée.

Résultats basés sur l'expérimentation Broadbalk de Rothamsted Research ; moyenne de 1996 à 2000 (Adapté d'après Brentrup et Pallière, 2008).

La fertilisation peut augmenter la teneur en matière organique du sol (MOS) en stimulant la croissance des plantes et des racines, si les résidus de culture sont laissés au sol. Comme les cycles de l'azote et du carbone du sol sont étroitement liés, un apport accru de carbone par les résidus peut fixer l'azote du sol, réduisant ainsi sa disponibilité pour les plantes. D'un autre côté, des apports excessifs d'engrais azoté peuvent accélérer la décomposition de la MOS. Des expérimentations à long terme menées dans le monde entier montrent qu'une utilisation adéquate et équilibrée des engrais minéraux entraîne une augmentation de la MOS par rapport aux parcelles ne recevant pas d'engrais. Les plus fortes augmentations de MOS sont généralement obtenues en intégrant des sources organiques et minérales de nutriments.

La reforestation peut séquestrer de grandes quantités de carbone, notamment dans les pays en développement. La seule façon pour libérer les terres nécessaires à la séquestration du carbone sans menacer la sécurité alimentaire dans ces pays est l'intensification de la production agricole sur certaines des meilleures terres en augmentant les apports d'engrais, en utilisant des variétés améliorées et en adoptant de bonnes pratiques de

gestion des cultures et des sols. Les calculs montrent que la séquestration du carbone dépasse largement les émissions associées à la production et à l'utilisation de l'engrais supplémentaire nécessaire (Vlek et al., 2004).

La gestion des sols, notamment les changements de pratiques de travail du sol, influent également fortement sur le niveau de la MOS. Des pratiques de fertilisation appropriées offrent une option intéressante pour assurer simultanément la séquestration du carbone dans les sols agricoles et l'amélioration de la fertilité des sols et, de ce fait, atténuer le changement climatique et améliorer la sécurité alimentaire.

Le changement climatique devrait augmenter la température et le stress hydrique. La gestion des nutriments offre des options pour répondre à certaines de ces contraintes. L'application de phosphate stimule la croissance des racines et, par conséquent, la tolérance à la sécheresse. Les cations tels que le potassium et le zinc améliorent également la tolérance au stress par le biais de différents mécanismes. Une fertilisation équilibrée est donc un outil important dont disposent les agriculteurs pour s'adapter au changement climatique.

GESTION DES NUTRIMENTS ET ENVIRONNEMENT

En plus du potentiel de réchauffement climatique du N_2O , les applications de nutriments (provenant de sources minérales et organiques) peuvent avoir un impact sur l'environnement de la façon suivante :

- Dépôts acides résultant des émissions anthropiques de dioxyde de soufre (SO_2), d'oxydes d'azote (NO_x) et d'ammoniac (NH_3);
- Eutrophisation des écosystèmes aquatiques (et terrestres) en augmentant les flux d'azote et de phosphore des terres agricoles vers ces écosystèmes ;
- Appauvrissement de l'ozone stratosphérique par les émissions de N_2O ;
- Formation de particules fines suite aux émissions de NH_3 ;
- Accumulation des nitrates (NO_3^-) dans les eaux souterraines.

En prenant les compromis en compte, les agronomes travaillent pour développer des bonnes pratiques d'utilisation (BPU) des engrais qui minimisent l'impact global sur l'environnement tout en maximisant les effets bénéfiques. En développant et en diffusant une gamme de BPU (dans les quatre domaines de la gestion des nutriments) tenant compte de la diversité écologique et des systèmes agricoles, il existe encore d'énormes possibilités d'accroître l'efficacité et l'efficacité à différentes échelles.

À titre d'exemple, le tableau suivant illustre les avantages et les limites de certaines pratiques d'application d'engrais phosphatés, combinaisons de source (S), quantité (Q), moment (M) et placement (P) pour la rotation maïs-soja dans le bassin versant du lac Érié en Amérique du Nord (Bruulsema et al., 2012).

PRATIQUE D'APPLICATION DU P	AVANTAGES	LIMITATIONS
OPTION 1 S – MAP ou DAP Q – Compensation des exportations de la rotation M – Automne après le soja et avant le maïs P – Epanchage en surface	<ul style="list-style-type: none"> • Compaction minimale du sol • Permet un semis à temps au printemps • Forme d'engrais meilleur marché • Faible coût d'application 	<ul style="list-style-type: none"> • Risque d'augmentation des pertes de phosphore par ruissellement en fin d'automne et au printemps • Faible efficacité d'utilisation de l'azote
OPTION 2 S – MAP ou DAP Q – Compensation des exportations de la rotation M – Printemps avant le maïs P – Epanchage en surface	<ul style="list-style-type: none"> • Compaction minimale du sol • Efficacité d'utilisation de l'azote améliorée • Forme d'engrais bon marché • Faible coût d'application 	<ul style="list-style-type: none"> • Risque d'augmentation des pertes de phosphore par ruissellement au printemps avant incorporation • Risque de semis tardif • Capacité de livraison du distributeur au printemps
OPTION 3 S – MAP ou APP liquide Q – Compensation des exportations de la culture M – Printemps P – Positionnement en bandes	<ul style="list-style-type: none"> • Meilleure efficacité de l'utilisation de l'azote • Peu de risque d'augmentation des pertes de phosphore par ruissellement • Moins de stratification du phosphore dans le sol 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût et facilité de semis avec un appareillage pour engrais • Risque de retarder le semis • Capacité de livraison du distributeur • Coût du phosphore liquide par rapport au phosphore granulé
OPTION 4 S – SMAP ou DAP Q – Compensation des exportations de la culture ou de la rotation M – Automne après le soja avant le maïs P – Positionnement en bandes	<ul style="list-style-type: none"> • Efficacité d'utilisation de l'azote et du phosphore améliorée • Peu de risque d'augmentation des pertes de phosphore par ruissellement • Maintien des résidus en surface • Permet un semis à temps au printemps • Moins de stratification du phosphore dans le sol 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût du guidage GPS • Coût des nouveaux équipements • Demande plus de temps que l'épandage en surface
OPTION 5 S – APP liquide Q – Compensation des exportations de la culture ou de la rotation M – Automne après le soja et avant le maïs P – Injection	<ul style="list-style-type: none"> • Peu de risque d'augmentation des pertes de phosphore par ruissellement • Efficacité d'utilisation de l'azote et du phosphore améliorée • Maintien de beaucoup de résidus en surface • Permet un semis à temps au printemps • Moins de stratification du phosphore dans le sol 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût du guidage GPS • Coût des nouveaux équipements • Coût du phosphore liquide par rapport au phosphore granulé • Demande plus de temps que l'épandage en surface

MAP = Phosphate monoammonique granulé

DAP = Phosphate diammonique granulé

APP= Polyphosphate d'ammoniaque liquide



7.

POINTS CLÉS

Les nutriments essentiels sont nécessaires pour cultiver des cultures saines, productives et nutritives.

Les cycles des nutriments sont des systèmes ouverts avec des pertes inévitables, qui ont des impacts négatifs sur la productivité des cultures, la rentabilité de l'agriculture et les services environnementaux. L'objectif est de réduire ces pertes tout en augmentant progressivement le rendement des cultures. Une utilisation plus efficace des nutriments, grâce à l'adoption de bonnes pratiques d'utilisation, optimise les effets bénéfiques et réduit les risques associés à l'intervention humaine sur les cycles des nutriments.

Une gamme de bonnes pratiques d'utilisation des engrais est mise à la disposition des agriculteurs. Ces pratiques devraient traiter les quatre domaines de la gestion des nutriments (source, quantité, moment et placement) et offrir des solutions qui répondent à la diversité des sites et des cultures afin d'améliorer la durabilité globale des systèmes de culture, en considérant les perspectives, économiques, sociales et environnementales (approche « gestion responsable des nutriments »).

Les engrais minéraux ne devraient pas être considérés isolément. Pour optimiser la durabilité et la performance de l'utilisation des engrais, les engrais minéraux devraient être combinés avec des sources organiques de nutriments, avec le choix de variétés appropriées et l'utilisation de pratiques de bonne gestion des cultures, de l'eau et du sol (approche « gestion intégrée de la fertilité des sols »).

Au-delà de la sécurité alimentaire et du revenu agricole, la gestion des nutriments peut influencer plusieurs objectifs de durabilité tels que la nutrition humaine, la santé des sols, la productivité de l'eau, l'atténuation et l'adaptation au changement climatique et la santé environnementale dans son ensemble. Bien gérés, les nutriments peuvent avoir un impact positif sur ces objectifs.



RÉFÉRENCES

Barker, A.V., M.L. Stratton and J.E. Rechcigl (2000). p. 169-213. In J.M. Bartels (ed.) Land Application of Agricultural, Industrial, and Municipal By-Products. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA.

Brentrup, F. and C. Pallière (2008). GHG emissions and energy efficiency in European nitrogen fertiliser production and use. Proceedings 639, International Fertiliser Society, York, UK.

Bruulsema, T.W., R. Mullen, I.P. O'Halloran and H. Watters (2012). Reducing loss of fertilizer phosphorus to Lake Erie with the 4Rs. IPNI Insights, International Plant Nutrition Institute, Norcross, GA, USA.

Erisman, J.W., M.A. Sutton, J. Galloway, Z. Klimont and W. Winiwarter (2008). How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience* 1, 636 – 639.

Geissler, D. and K.M. Scow (2014). Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms – A review. *Soil Biol. Biochem.* 75: 54-63.

Glatzle, A. (2014). Severe Methodological Deficiencies Associated with Claims of Domestic Livestock Driving Climate Change. *Journal of Environmental Science and Engineering B* 2: 586-601.

Hotz, C. and K.H. Brown (2004). Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control. *Food Nutr. Bull.* 25: 94–204.

IFA (2009). The Global “4R” Nutrient Stewardship Framework for Developing and Delivering Fertilizer Best Management Practices. International Fertilizer Industry Association, Paris, France.

IPNI (2012). 4R Plant Nutrition Manual: A Manual for Improving the Management of Plant Nutrition, metric version. Bruulsema, T.W., P.E. Fixen and G.D. Sulewski (eds.), International Plant Nutrition Institute, Norcross, GA, USA.

Körschens, M., E. Albert, M. Armbruster, D. Barkusky, M. Baumecker, L. Behle-Schalk, R. Bischoff, Z. Čergan, F. Ellmer, F. Herbst, S. Hoffmann, B. Hofmann, T. Kismanyoky, J. Kubat, E. Kunzova, C. Lopez-Fando, I. Merbach, W. Merbach, M.T. Pardor, J. Rogasik, J. Rühlmann, H. Spiegel, E. Schulz, A. Tajnsek, Z. Toth, H. Wegener and W. Zorn (2013). Effect of mineral and organic fertilization on crop yield, nitrogen uptake, carbon and nitrogen balances, as well as soil organic carbon content and dynamics: results from 20 European long-term field experiments of the twenty-first century. *Arch. Agron. Soil Sci.* 59: 1017-1040.

Ladha, J.K., C. Kesava Reddy, A.T. Padre and C. van Kessel (2011). Role of nitrogen fertilization in sustaining organic matter in cultivated soils. *J. Environ. Qual.* 40: 1756-1766.

Reetz, H.F. Jr. (2016). Fertilizers and their Efficient Use. International Fertilizer Industry Association, Paris, France.

Vlek, P.L., G. Rodriguez-Kuhl and R. Sommer (2004). Energy use and CO₂ production in tropical agriculture and means and strategies for reduction or mitigation. *Environment, Development and Sustainability* 6: 213-233.

Zhang X., E.A. Davidson, D.L. Mauzerall, T.D. Searchinger, P. Dumas and Y. Shen (2015). Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*, doi: 10.1038/nature15743.

