

Présentation du Comifer

Le Comifer, Comité français d'étude et de développement de la fertilisation raisonnée, est une association, créée en 1980, régie par la loi du 1^{er} juillet 1901.

Il organise une concertation permanente entre les acteurs de la fertilisation raisonnée afin d'élaborer et promouvoir des méthodes collectivement validées, d'encourager les solutions innovantes qui concourent à une agriculture durable, performante et respectueuse de l'environnement.

Missions

- Favoriser et développer les contacts et les échanges d'idées entre toutes personnes et tous les organismes concernés par une maîtrise aussi complète que possible de la fertilisation et de toutes ses conséquences.
- Diffuser l'information du monde agricole en liaison avec les organismes chargés de l'enseignement, de la formation continue et du développement agricole.
- Organiser des réunions de toutes sortes sur les problèmes de fertilisation, soit directement, soit par l'intermédiaire d'autres organismes ou avec leur collaboration.
- Collaborer avec toute organisation nationale ou internationale ayant, en tout ou partie, un objet analogue à celui du Comifer.
- Proposer la mise en œuvre de tous les moyens propres à harmoniser et encourager les progrès touchant la fertilisation raisonnée.

Les groupes de travail

Les adhérents du Comifer participent aux groupes de travail de leur choix et partagent leurs connaissances et propositions d'innovation dans le raisonnement de la fertilisation.

Les membres peuvent porter un projet, créer ou réactiver un groupe de travail lorsqu'un sujet d'étude émerge, en associant d'autres partenaires comme les RMT- Réseaux Mixtes Technologiques. Ils initient des travaux de recherche, proposent et rédigent des documents de référence. La pluralité des membres assure une approche pragmatique des thèmes abordés.

Groupe P K et Mg (Phosphore Potassium et Magnésium)

L'objectif de ce groupe est de formaliser une vision pragmatique de la dynamique de ces éléments nutritifs afin d'améliorer les outils de raisonnement en s'appuyant sur des données disponibles.

Le groupe se penche également sur l'évaluation de la qualité des produits fertilisants, parmi lesquels de plus en plus de produits complexes issus du recyclage des déchets.

Groupe N et S (Azote et Soufre)

Ce groupe participe à une même réflexion autour des problématiques azote et soufre: décryptage des mécanismes expliquant les flux d'azote et de soufre dans le système sol-plante-atmosphère, application aux approches environnementales et à la prescription de fertilisation azotée, mise en place de la directive européenne sur le nitrate, rédaction du guide méthodologique pour le calcul de la fertilisation azotée des cultures annuelles, état du bilan de l'élément nutritif soufre en France, inventaire des préconisations en matière de fertilisation soufrée, à terme aller vers une méthode d'aide au raisonnement de la fertilisation soufrée.

Groupe SAB (Statut Acido-Basique)

Ce groupe collecte les références, identifie l'ensemble des éléments nécessaires au raisonnement et à la pratique du chaulage et en assure la vulgarisation auprès de tous les acteurs de la filière. Il aborde 4 thèmes principaux: la compréhension des modes d'action des amendements dans les sols, l'établissement des références sur le statut acido-basique souhaitable par système de culture, la réflexion autour de l'évaluation du besoin en amendement minéraux basique (AMB), notamment pour l'élaboration de logiciels de conseil de dose, ainsi que le choix des produits suivant les situations.

Groupe PRO (Produits Résiduaire Organiques)

Ce groupe aborde toutes les problématiques techniques et scientifiques liées au recyclage des PRO et leur valorisation en agriculture: inventaire et gisement, typologie et caractérisation, valeur agronomique, innocuité, conditions d'utilisation et expérimentation. Il assure la bonne diffusion de cette information et met à disposition une base de références documentaires françaises sur le site du Comifer.

Les événements

Les Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse

Créées en 1993, les Rencontres sont devenues un rendez-vous de référence pour les professionnels de la fertilisation raisonnée. Événement biennal, il est organisé en partenariat avec le Gemas (Groupement d'études méthodologiques et d'analyses des sols) et avec la participation de l'Afes (Association française pour l'étude du sol). Ce colloque rassemble pendant 2 jours enseignants, chercheurs, prescripteurs, distributeurs et industriels venus échanger et actualiser leurs connaissances sur l'évolution des raisonnements et des techniques de mesure de la fertilité des sols et des pratiques de fertilisation.

Les Journées thématiques

Les Journées thématiques permettent d'apporter un éclairage sur un sujet agronomique en échangeant sur les enjeux et les bonnes pratiques liés à celui-ci.

Les études

Acteur référent auprès des pouvoirs publics, le Comifer réalise des études techniques dont certaines en réponse à des sollicitations émanant du ministère de l'Agriculture, en collaboration avec le Réseau Mixte Technologique Fertilisation et Environnement.

Les publications

Fruits des réflexions menées par les groupes de travail, le Comifer rédige des supports pédagogiques, des ouvrages de référence (tels *Calcul de la fertilisation azotée*, *Le chaulage*, *L'épandage*) qui peuvent être commandés sur www.comifer.asso.fr.

Le Comifer édite une newsletter trimestrielle, La Lettre du Comifer.

Le site web www.comifer.asso.fr

- Une plate-forme d'information.
- Des ressources documentaires publiques à consulter.
- Les actes des Rencontres et les présentations des Journées thématiques à télécharger.
- Un extranet, spécialement réservé aux adhérents du Comifer.

Organisation

L'association se compose de membres actifs (personnes physiques) et de membres associés (personnes morales), répartis selon leur origine professionnelle en 3 collèges représentés au conseil d'administration.

Les ressources propres du Comifer proviennent de dotations statutaires égales pour chacun des 3 collèges, de cotisations d'adhérents et de contributions de membres associés.

Le conseil d'administration est composé de 27 membres, à raison de 9 membres par collège.

La gestion est assurée par un bureau composé d'un président, de 3 Vice-Présidents –1 par collège –, d'un trésorier et d'un secrétaire.

La déléguée générale assure l'administration, la gestion, l'évènementiel et la coordination de l'ensemble des activités du Comifer.

La chargée de mission participe à l'animation des Groupes de Travail et à la diffusion de leurs travaux notamment sur internet. Elle réalise également des études techniques dont certaines réalisées à la demande des Pouvoirs Publics (ministère de l'Agriculture en particulier).

Adhérer au Comifer, c'est :

- S'engager dans une association de professionnels convaincus d'une fertilisation performante comme facteur de progrès.
- Partager ses connaissances, ses compétences et ses expériences.
- Apporter une réponse collective et consensuelle à des problématiques agricoles et sociétales.
- Participer aux travaux et au rayonnement de l'association dans un esprit professionnel et convivial.

Les avantages réservés aux adhérents :

- La participation aux Groupes de Travail de leur choix.
- L'accès à l'extranet, espace réservé exclusivement aux adhérents.
- L'application de tarifs préférentiels sur l'ensemble des événements et publications.
- L'accès prioritaire à la réservation d'événements.
- Le partage d'informations agronomiques avec la Lettre du Comifer et le site internet.
- La participation et le vote à l'assemblée générale et la présentation d'un acte de candidature au conseil d'administration.

Il est possible d'adhérer au Comifer à titre individuel ou en tant que membre associé et ainsi soutenir plus activement les projets et le déploiement des missions du Comifer.

Téléchargez le bulletin d'adhésion sur www.comifer.asso.fr



Comifer
Le Diamant A
92909 Paris La Défense Cedex – France
www.comifer.asso.fr

Sommaire

Présentation du Comifer	III
Missions	III
Les groupes de travail	III
Les événements	IV
Les études	IV
Les publications	IV
Organisation	V
Liste des sigles	XIII
Préface	XVI
1 Introduction à l'ouvrage	1
I. Pourquoi ce Guide de la fertilisation raisonnée ?	1
II. Un guide de la fertilisation au regard de ses enjeux productifs, économiques et environnementaux	2
A. Enjeux productifs de la fertilisation	4
B. Enjeux environnementaux	11
C. Enjeux économiques de la fertilisation pour les producteurs	12
D. Raisonner la fertilisation dans le cadre d'une gestion intégrée des nutriments ...	13
PARTIE I – LES BASES DE LA FERTILISATION	17
2 Contexte de la fertilisation	18
I. Réglementation encadrant l'utilisation des matières fertilisantes	18
A. Principe	18
B. Quelques définitions	18
C. Procédures pour la mise sur le marché en France	19
D. Obligations liées à l'utilisation	21
E. Réglementation sanitaire relative aux sous-produits animaux non destinés à la consommation humaine	22
F. Lien qualité sanitaires des denrées/fertilisants	22
II. Fertilisation, protection de l'environnement et gestion durable des ressources	23
A. Introduction	24
B. Fertilisation, qualité de l'eau et des écosystèmes aquatiques	25
C. Fertilisation et qualité de l'air	28
D. Fertilisation, émissions de gaz à effet de serre et changement climatique	28
E. Un enjeu émergent de gestion durable d'une ressource : le cas du phosphore	30
F. Conclusions	32
III. Démarches volontaires et raisonnement de la fertilisation	33
A. Des approches filières par culture	33
B. Fertilisation dans le système de production de l'exploitation	35
C. Mode de production en agriculture biologique	36
D. Initiatives de pratiques agroécologiques	36

3	Fonctionnement du peuplement végétal et besoins en nutriments	40
I.	Petit historique des sciences relatives à la nutrition minérale des plantes.....	40
II.	Définition des minéraux indispensables à la croissance et au développement des plantes.....	41
	A. <i>Les plantes: essentiellement du C, O, H</i>	41
	B. <i>La liste des minéraux indispensables reste ouverte</i>	42
	C. <i>Il y a aussi des minéraux spécifiquement indispensables</i>	42
	D. <i>D'autres minéraux dont les plantes se passent mais dont la présence peut se révéler positive</i>	43
	E. <i>Éléments: plus il y en a, mieux c'est?</i>	44
	F. <i>Qu'est-ce qu'un élément limitant?</i>	45
	G. <i>Pourquoi est-il si difficile de connaître les concentrations de minéraux dans les plantes?</i>	45
	H. <i>Récapitulatif des rôles principaux joués par les minéraux</i>	47
III.	Définition de la demande (besoins) en minéraux.....	48
	A. <i>Demande instantanée, exportation, prélèvements totaux</i>	48
	B. <i>Dynamiques de prélèvement, transferts internes</i>	48
	C. <i>Cas des plantes bisannuelles et pérennes</i>	50
	D. <i>Attention à la confusion possible entre besoins et exigence</i>	51
IV.	Mécanismes clés du transfert sol-plante des minéraux.....	52
	A. <i>Les minéraux contenus dans le flux hydrique de transpiration ne suffisent pas toujours à l'alimentation des plantes</i>	52
	B. <i>Surface d'échange racinaire, paramètre clé du prélèvement</i>	53
	C. <i>La plante investit là où ça rapporte</i>	54
	D. <i>Toutes les plantes puisent-elles leurs ressources minérales dans les mêmes stocks?</i>	54
V.	Que se passe-t-il lorsque l'offre du sol devient insuffisante par rapport aux besoins des plantes?.....	56
	A. <i>Déficience, carence: surtout un manque... de clarification!</i>	56
	B. <i>Cas des carences sans déficiences</i>	57
	C. <i>Principaux désordres physiologiques liés aux carences minérales</i>	58
	D. <i>Symptomatologie des carences</i>	58
	E. <i>Quand est-il le moins grave de manquer de minéraux dans le sol?</i>	59
	F. <i>Pourquoi les plantes placées sur des sols pauvres utilisent-elles si bien leurs ressources?</i>	60
VI.	La nutrition foliaire peut-elle représenter une contribution significative au transfert de minéraux?.....	63
	A. <i>Raisons évoquées (pas seulement scientifiques) justifiant l'utilisation d'engrais foliaires</i>	63
	B. <i>Mécanismes de l'absorption foliaire à l'échelle cellulaire et de la feuille</i>	63
	C. <i>Les réponses des plantes aux pulvérisations foliaires</i>	64
	D. <i>Limites et perspectives de la technique, à l'échelle du peuplement: Spray and Pray!</i>	64
VII.	Problématiques de recherche actuellement développées sur la nutrition des plantes.....	65
4	Le sol et ses facteurs de fertilité	68
I.	Définition.....	69
II.	Composition du sol.....	69
III.	Analyse granulométrique et texture.....	70

IV. Physico-chimie : pH et capacité d'échange cationique	73
A. La notion de pH et son application en agronomie	73
B. Capacité d'échange cationique, charge variable et taux de saturation	74
C. Sources d'acidification du sol (Dufey, 2001)	75
V. Structure du sol : rétention et circulation de l'eau et de l'air	77
VI. Organismes vivants	81
A. Micro-organismes	81
B. Microfaune, mésofaune et macrofaune	83
C. Quelques rôles des organismes vivants dans le sol	83
VII. Processus biologiques de régulation de la dynamique des nutriments et de leur biodisponibilité pour les plantes	84
A. Concept de disponibilité et de biodisponibilité environnementales des éléments	84
B. Importance de l'architecture racinaire	85
C. Exsudats et effets sur les propriétés du sol	86
D. Rôle spécifique des communautés microbiennes symbiotiques	88
E. Rôle de la boucle microbienne dans le recyclage de N et P (protistes et nématofaune)	90
F. Rôle de la macrofaune	90
VIII. Conclusions	91
5 Cycles biogéochimiques des éléments nécessaires à la production agricole	93
I. Cycle biogéochimique du carbone et matières organiques	93
A. Cycle du carbone à l'échelle globale et bénéfices du carbone	93
B. Biotransformations du carbone dans les sols et nature des matières organiques	96
C. Dynamique du carbone organique	99
D. Modèles de simulation numérique de la dynamique du carbone	103
E. Conclusions	104
II. Cycle biogéochimique de l'azote	105
A. Introduction : l'azote, un composé essentiel à la vie	105
B. L'azote réactif, des formes et des origines multiples	106
C. Un cycle profondément modifié par les activités humaines	106
D. Un composé très mobile dans l'environnement, aux impacts multiformes et multi-échelles	109
E. Transformations de l'azote dans le sol	111
F. Conclusions	119
III. Cycle biogéochimique du soufre	120
A. Le soufre dans l'environnement	120
B. Le soufre dans le système sol-plante	122
C. Conclusion	130
IV. Cycle biogéochimique du phosphore	130
A. Introduction	131
B. Fonctionnement du cycle biogéochimique du phosphore dans les agrosystèmes	132
C. Évaluation de la fraction phytodisponible du phosphore du sol et dynamique sous l'effet de pratiques culturales	134
D. Modélisation du fonctionnement du cycle du phosphore à l'échelle de la parcelle cultivée	138
E. Conclusions et perspectives	139

V.	Cycle biogéochimique du potassium	140
	A. Origines géologiques du potassium	140
	B. Le potassium dans les sols provient de l'altération des roches	142
	C. Prélèvements de K par les plantes	144
	D. Pertes de K par lixiviation : processus, grandeurs, impacts	148
VI.	Cycle biogéochimique du magnésium	150
	A. Origines géologiques du magnésium	151
	B. Magnésium dans les sols : un cation qui a du mal à trouver sa place	151
	C. Alimentation des plantes en Mg : compartiments du sol, engrais, amendements ..	152
	D. Carences induites en Mg liées aux antagonismes avec les cations Ca et K	155
	E. Lixiviation du Mg : un flux parfois supérieur à celui du prélèvement par les plantes	155
	F. Risques encourus par des carences ou des excès de Mg	155
VII.	Cycle biogéochimique du calcium	156
	A. Introduction	156
	B. Le calcium dans la lithosphère	157
	C. Le calcium dans le sol	157
	D. Effets agronomiques directs et indirects du calcium	159
	E. Acidification des sols et décalcification	160
	F. Pertes de calcium	160
	G. Calcium dans la plante	161
	H. Comparaison synthétique des caractéristiques des ions K, Ca et Mg	162
VIII.	Biogéochimie des oligoéléments	163
	A. Introduction	164
	B. Les OE dans la plante	164
	C. Les OE dans le sol	169
	D. Raisonnement de la fertilisation des OE en agriculture	173
PARTIE II – LE RAISONNEMENT DE LA FERTILISATION		185
6	Gestion des sols pour la production agricole	186
I.	Gestion de la fertilité globale des sols	186
	A. Le sol contribue au service de production	186
	B. Qu'est-ce que la fertilité du sol?	187
	C. Comprendre la fertilité du sol : le sol vu comme un écosystème	190
	D. Évaluer la fertilité du sol : les outils du diagnostic	194
	E. Améliorer la fertilité d'un sol : les leviers disponibles	202
II.	Gestion de l'état organique des sols	207
	A. Introduction	207
	B. Modélisation du bilan humique	210
	C. Du modèle à l'aide à la décision	214
	D. Conclusions	224
III.	Gestion du statut acido-basique des sols	226
	A. Introduction	227
	B. Statut acido-basique (SAB) des sols et indicateurs associés	228
	C. Acidification des sols cultivés	239
	D. Gestion du SAB des sols cultivés	242

IV.	Gestion de l'état structural des sols	253
	A. Des pratiques de travail du sol de plus en plus diversifiées	253
	B. Conséquences sur la dynamique de la structure du sol et la localisation de la matière organique	255
	C. Travail du sol, dynamique de l'état physique du sol et enracinement	258
	D. Conséquences sur la disponibilité des éléments	260
7	Raisonnements pratiques de la fertilisation à l'échelle des parcelles cultivées ...	265
I.	Gérer la fertilisation: boucles de raisonnement et échelles de temps	265
	A. Les schémas de raisonnement dépendent du devenir des éléments minéraux dans le système sol plante	265
	B. Conséquence: trois échelles de temps du raisonnement	266
	C. Contrôler le plan d'action pour ajuster sa stratégie	267
II.	Diagnostic d'état nutritionnel des cultures	270
	A. Principes et méthodes basés sur l'analyse de plante	270
	B. Diagnostic d'état nutritionnel des cultures par mesure radiométrique	280
III.	Diagnostic de biodisponibilité des éléments dans le sol	290
	A. Diagnostic de biodisponibilité, étape clé du raisonnement de la fertilisation	290
	B. « Biodisponibilité »: un mot piégé	291
	C. Étape 1 du raisonnement: les analyses sur les « éléments biodisponibles », indicateurs de fertilité chimique des sols	294
	D. Étape 2 du raisonnement: objectifs et limites d'un diagnostic de biodisponibilité	299
IV.	Raisonnement de la fertilisation pour les grandes cultures	305
	A. Raisonnement de la fertilisation azotée en grandes cultures	305
	B. Raisonnement de la fertilisation soufrée en grandes cultures	334
	C. Raisonnement de la fertilisation phosphatée en grandes cultures	343
	D. Raisonnement de la fertilisation potassique, magnésienne et calcique en grandes cultures	356
	E. Raisonnement de la fertilisation en oligoéléments en grandes cultures	367
V.	Raisonnement de la fertilisation pour les cultures pérennes	377
	A. Raisonnement de la fertilisation des prairies	377
	B. Raisonnement de la fertilisation en arboriculture fruitière	390
	C. Raisonnement de la fertilisation en viticulture	399
8	Mise en œuvre de la fertilisation	419
I.	Les différents types de fertilisants	419
	A. Fertilisation organique et minérale en France	420
	B. Amendements minéraux basiques (AMB)	421
	C. Engrais azotés minéraux	424
	D. Engrais phosphatés minéraux	427
	E. Engrais potassiques minéraux	431
	F. Engrais magnésiens, calciques, soufrés et oligoéléments minéraux	434
	G. Engrais minéraux composés	436
	H. Fertilisants organiques	437
	I. Fertilisants organo-minéraux (N, NPK, NP, NK)	440
	J. Fertilisants spéciaux	441
II.	Épandage des fertilisants	443
	A. Épandage des fertilisants organiques et minéraux	444

B. Épandage des fertilisants minéraux solides	446
C. Épandage des fertilisants minéraux liquides	457
D. Épandage des fertilisants organiques	460
E. Labels, normes, réglementation et contrôles	478
9 Raisonnements à l'échelle des exploitations agricoles	483
I. Contrôle de fertilité périodique à l'échelle de l'exploitation	483
A. Outils du contrôle périodique de fertilité	483
B. Choix des parcelles et périodicité des analyses	485
C. Modalités de prélèvement	487
D. Choix d'un laboratoire	491
E. Méthodes d'analyses de terre	492
F. Des outils qui s'intègrent dans un raisonnement global	501
II. Élaboration des plans de fumures	502
A. La fertilisation : des enjeux multiples pour les agriculteurs	503
B. Des enjeux complexes qui nécessitent une approche consolidée à l'exploitation ...	505
C. Élaboration concrète des plans de fumure grâce aux OAD	507
D. Les bénéfices de l'approche à l'exploitation	510
E. Perspectives	512
III. Bilans entrées/sorties d'éléments minéraux à l'échelle de l'exploitation agricole	513
A. Introduction	513
B. Principes des bilans entrées/sorties	514
C. Un outil pour identifier les excès ou déficits d'éléments minéraux	517
D. Un outil pour hiérarchiser les postes contributeurs à la gestion des éléments minéraux	518
E. Un outil pour estimer l'efficacité de l'exploitation en matière d'éléments minéraux	518
F. Limites du bilan entrées/sorties	519
G. Conclusions	522
 PARTIE III – FERTILISATION ET GESTION INTÉGRÉE DES NUTRIMENTS À L'ÉCHELLE DES SYSTÈMES DE CULTURE	 525
10 Systèmes de culture et gestion des nutriments	526
I. Insertion des légumineuses dans les systèmes de culture : source d'azote symbiotique et de diversification des assolements	526
A. Introduction	526
B. Comprendre le fonctionnement spécifique des légumineuses, ses déclinaisons selon les espèces utilisées et le mode d'insertion dans les assolements	528
C. Quantifier les effets azotés directs et indirects des légumineuses, comprendre les facteurs majeurs de variabilité	532
D. Conclusions	540
II. Des cultures associées pour une gestion économe de l'azote et du phosphore dans les agroécosystèmes	541
A. Contexte, définition, diversité et intérêts des cultures associées	541
B. Cultures associées et azote : compétition et complémentarité	543
C. Cultures associées et phosphore : une possible facilitation	544
D. Conclusions pour la mise en œuvre des cultures associées	545

III. Des CIMS pour recycler l'azote et les éléments minéraux dans les agroécosystèmes	545
A. Contexte, définition, et fonctions des CIMS	545
B. L'effet « piège à nitrate » des CIMS	546
C. L'effet engrais vert de CIMS est fonction des espèces utilisées.....	551
D. Réussir l'implantation d'une CIMS nécessite d'adapter sa date de semis et de choisir les espèces adaptées.....	551
E. Autres services écosystémiques des CIMS et les dys-services	551
F. Conclusions : des CIMS dans les agrosystèmes français.....	553
IV. Intérêt des systèmes de polyculture-élevage pour recycler les nutriments et limiter le recours aux engrais de synthèse	554
A. Des liens entre productions animales et végétales à valoriser.....	554
B. Des légumineuses pour être moins dépendant des engrais et des tourteaux	556
C. Réintroduire des prairies au sein des rotations pour mieux coupler les cycles de C et N.....	556
D. Introduire des cultures pièges à nitrate valorisables par les animaux	557
E. Mieux valoriser les effluents d'élevage pour recycler les nutriments et stocker du carbone	558
F. Réintroduire de l'élevage dans les territoires de grandes cultures.....	559
G. À quelle échelle géographique faut-il repenser les recyclages?.....	559
V. Agroforesterie et gestion des nutriments.....	560
A. Diversité des systèmes agroforestiers.....	560
B. Cycles des nutriments en agroforesterie.....	561
C. Fertilisation en systèmes agroforestiers.....	561
D. Conclusions.....	565
VI. Prise en compte des pratiques de fertilisations dans les méthodes d'évaluation agri-environnementale des systèmes de culture	565
A. Introduction	565
B. Différents types d'indicateurs.....	566
C. Fertilisation azotée	567
D. Fertilisation phosphatée	570
E. Approche actuelle basée sur l'ACV.....	571
F. Discussion	572
G. Conclusions : quels indicateurs choisir?	573
11 Perspectives	580
I. Des échelles de raisonnement plus variées et plus nombreuses	580
II. Ressources et choix plus large de matières fertilisantes	581
III. Exigences diverses des filières répondant à différents marchés	581
IV. Enjeu majeur de la protection de l'eau, de l'air et des sols.....	582
V. Développement de l'agriculture numérique.....	582
Remerciements.....	584
Coordonnées des auteurs et contributeurs.....	585
Index	590

Préface

« Le fondement de l'agriculture est la connaissance du naturel des terroirs que nous voulons cultiver. » C'est par cette affirmation qu'Olivier de Serres, en l'an 1600, introduit la première édition de son *Théâtre d'agriculture et mesnage des champs*. La connaissance des sols et leur amélioration constituent clairement la base d'un des premiers traités d'agronomie moderne. La fertilisation apparaît donc comme le vecteur des recherches et des innovations dans le domaine de l'agronomie.

Plus près de nous, des progrès significatifs sur le comportement des sols et les phénomènes physico-chimiques impliqués ont été réalisés par de nombreux chercheurs, tels H. Demolon, P. Boischoit, G. Barbier, J. Hébert et bien d'autres. Cet ensemble de connaissances a servi de base aux premières recommandations diffusées au siècle dernier, et a permis de faire connaître l'intérêt de l'usage des premiers « engrais ». C'est dans la deuxième partie du XX^e siècle, après la Seconde Guerre mondiale que la « vulgarisation » s'organise, grâce aux efforts conjugués des stations agronomiques, des structures des chambres d'agriculture, des instituts techniques et des services agronomiques de la profession des engrais et de la distribution. Les laboratoires d'analyse de sol se développent et contribuent à cet effort.

Un des premiers ouvrages pratiques, consacré à la fertilisation, est paru en 1957 sous le titre *Engrais, Guide pratique de la fertilisation* par André Gros, correspondant de l'Académie d'Agriculture de France. Il a été largement diffusé. Alliée aux améliorations génétiques et aux progrès de la protection des plantes, la fertilisation a entraîné une hausse régulière des rendements des cultures. En matière de céréales, le fractionnement de la fumure azotée, mis au point par Y. Coïc, chercheur à l'INRA, largement diffusé, a été généralisé. Cela a constitué une des premières étapes de la « fertilisation raisonnée ».

Au début des années 1980, le « rapport Hénin » met le doigt sur le risque de pollution diffuse des eaux par les nitrates d'origine agricole. Cela a incité tous les agronomes concernés par l'emploi de l'azote, et plus généralement par les différents aspects de l'emploi des fertilisants, à se rapprocher davantage pour échanger, coordonner leurs travaux et jeter les bases des principes de « fertilisation raisonnée ». Le Comifer (Comité français d'étude et de développement de la fertilisation raisonnée) était né. Depuis, il n'a cessé de préciser les règles de mise en application de ces principes, notamment au cours des « journées » organisées tous les deux ans. La protection de l'environnement, ainsi que l'adaptation aux différents systèmes de culture sont systématiquement prises en compte. D'autres colloques plus spécifiques, en particulier sur l'azote, ont également été organisés principalement en partenariat avec l'Académie d'Agriculture de France.

Le premier *Guide de la fertilisation raisonnée* a été produit par le Comifer en 2005, rédigé par Christian Schwartz, Jean-Charles Muller et Jacques Decroux. Il rassemble de manière systématique les informations et données constituant les bases de la fertilisation.

Plus de 10 ans après, ce nouvel ouvrage collectif fait le point sur les bases et les avancées en matière de fertilisation raisonnée. Il constitue donc une contribution majeure à la définition d'une agronomie moderne.

Il m'est particulièrement agréable de vous en laisser découvrir le contenu.

Jean-Claude Ignazi
Membre de l'Académie d'Agriculture de France

Introduction à l'ouvrage

1

I. Pourquoi ce Guide de la fertilisation raisonnée ?

Christine Le Souder, Présidente du Comifer

La fertilisation des cultures est aujourd'hui au cœur de grands enjeux économiques, environnementaux et sociétaux liés à l'agriculture. Nombre de domaines et d'acteurs sont concernés, tout au long des filières agricoles et au-delà (gestionnaires de la qualité de l'eau, législateurs...). L'échange et le partage des informations et des travaux entre tous sont actuellement nécessaires afin de faire progresser l'activité agricole dans ses rôles de production de biens et de services, et son intégration dans une société soucieuse de la préservation de l'environnement et des ressources naturelles.

Le raisonnement de la fertilisation est incontournable pour répondre aux objectifs et contraintes de la production agricole, liés à ces enjeux. La fertilisation raisonnée consiste à ajuster les apports d'éléments nutritifs aux besoins des cultures en complément des fournitures du sol, en se basant sur des raisonnements agronomiques partagés et adaptés aux différents contextes. Mais ceux-ci évoluent, à la fois dans le temps et dans leur diversité, sous l'effet de la réglementation, de la situation économique, de l'innovation technique et de nouveaux systèmes de culture... Les règles de raisonnement de la fertilisation évoluent donc aussi, parfois en se complexifiant. Le besoin se fait sentir de communiquer sur les acquis, de former les jeunes arrivant dans le secteur agricole, d'actualiser les connaissances des praticiens, agriculteurs et conseillers, et de participer à la justification des interventions agricoles aux yeux de la société.

Le Comifer a souhaité faire l'exercice de recueillir, présenter et diffuser les connaissances actualisées sur la fertilisation raisonnée, dès la première édition de ce *Guide* en 2005. Cela répond à nos missions de partage des informations et de leur diffusion vers l'ensemble des acteurs concernés, en visant un large public, du conseil à l'enseignement, en passant par la recherche et l'activité agricole. Sont d'abord présentées les connaissances de base permettant de resituer la place des éléments nutritifs dans les cycles biogéochimiques – l'agriculture jouant un rôle majeur en modifiant certains flux –, puis les règles de décision permettant le calcul de doses d'engrais éventuellement nécessaires sont détaillées. Ces règles sont essentiellement issues de productions des groupes thématiques du Comifer (NS, PKMg, Statut acido-basique et Produits résiduaux organiques), montrant leur rôle prépondérant dans l'établissement de consensus opérationnels appuyés sur les connaissances scientifiques les plus récentes et la connaissance objective des pratiques agricoles.

Ce Guide présente l'ensemble des références actualisées pour l'intégralité des éléments minéraux nutritifs essentiels aux plantes cultivées, ainsi que celles concernant les caractéristiques du sol dont on cherche l'amélioration pour favoriser la croissance des cultures. Sont concernées ici la totalité des plantes cultivées, des grandes cultures aux légumes de plein champ, en passant par l'arboriculture, la vigne et les prairies.

Il constitue la mise à jour de la première édition de 2005, avec les nouveaux développements qu'impose une décennie d'évolution des perceptions et des connaissances. Il a été rédigé par plus de 60 spécialistes reconnus dans les domaines traités, issus des instituts de recherche, écoles d'agronomie, instituts techniques, laboratoires d'analyse de terre, chambres d'agriculture, et de la sphère du conseil agricole au sens le plus large.

Cette nouvelle édition était attendue à plusieurs titres ! Les progrès réalisés au cours des quinze dernières années justifient pleinement l'actualisation des connaissances dont le Guide est porteur : de nouvelles avancées scientifiques, des acquis sur le raisonnement des

apports d'amendements basiques et une actualisation des principes de la gestion du phosphore (P) et du potassium (K), un travail de formalisation des connaissances sur la méthode du bilan prévisionnel pour la fertilisation azotée, de nouveaux outils de diagnostic et de pilotage des cultures sur le terrain, de nouvelles matières fertilisantes. L'émergence de l'agroécologie met en valeur les composantes de la fertilité du sol en lien avec les systèmes de culture, l'apparition et la montée en puissance d'innovations en matière d'itinéraires techniques et de systèmes de culture innovants déployés par les agriculteurs. À titre d'exemple, le recours à des couverts temporaires ou permanents multiservices se diffuse de plus en plus largement. Leurs effets attendus sur les flux d'azote peuvent être importants. Un chapitre nouveau les concernant a donc été introduit.

Ce Guide vous propose une présentation quasi exhaustive du contenu de la fertilisation raisonnée. Elle repose sur des choix susceptibles d'aider le lecteur à repérer les informations qui lui sont essentielles :

- un chapitre introductif dresse un tableau du contenu, en se référant aux grands enjeux de la fertilisation, la plupart des chapitres renvoyant à plusieurs de ces enjeux;
- une structuration en trois parties :
 - présentation du contexte général (contraintes environnementales, réglementation...) et des bases scientifiques de la fertilisation avec le fonctionnement de la plante, du sol et des cycles biogéochimiques des principaux éléments,
 - les règles de raisonnement, élément par élément, et de gestion des sols au niveau parcellaire,
 - l'intégration de ces principes dans une vision de gestion de la fertilité à l'échelle du système de culture et du territoire;
- un index détaillé facilite les entrées dans le Guide; les expressions ou termes indexés ont été sélectionnés pour un public doté d'une culture agronomique de base, ou en cours d'acquisition (cible privilégiée de l'ouvrage);
- des renvois de chapitre à chapitre permettent d'exploiter au mieux une inévitable redondance de contenu entre certains chapitres;
- des références bibliographiques renvoient autant que possible à des documents en français aisément accessibles sur internet, à caractère synthétique, permettant d'en savoir plus sur les thèmes traités et/ou d'identifier les producteurs d'information ou acteurs concernés;
- une mise en page soignée réalisée par l'éditeur, notamment au niveau des illustrations.

Vous en souhaitant, au nom du Comifer, une agréable et fructueuse lecture !

II. Un guide de la fertilisation au regard de ses enjeux productifs, économiques et environnementaux

Bruno Colomb (INRA)

La fertilisation, comme ensemble de pratiques d'apport de nutriments sur une aire exploitée par l'homme pour sa production végétale, a une longue histoire. On sait désormais que des céréales et des légumineuses sauvages ont été cultivées bien avant leur domestication¹, entre 11500 et 10500 avant notre ère (Willcox, 2012). Une augmentation, au cours du temps de la taille des grains de morphologie sauvage a été observée dès cette époque préagricole. Selon les archéologues, cette augmentation pourrait être une conséquence de la mise en place des « cultures » sur des zones de terres plus favorables, plus fertiles, dans la mesure où un effet

1. La domestication d'une espèce, animale ou végétale, est « l'acquisition, la perte ou le développement de caractères morphologiques, physiologiques ou comportementaux nouveaux et héréditaires, résultant d'une interaction prolongée, d'un contrôle, voire d'une sélection délibérée, de la part des communautés humaines » (d'après Wikipédia). Pour Willcox (2012), la pression sélective exercée par les premiers cultivateurs n'était pas suffisante pour produire de tels effets: la culture a précédé la domestication.

de pression sélective ne peut pas encore être invoqué. Il est probable aussi que, dans le même temps, les groupes humains aient observé l'effet des résidus organiques ou des cendres qu'ils produisaient sur la croissance des plantes sauvages ou cultivées. Les résidus de l'activité humaine étaient répartis à proximité des sites d'occupation, et leurs effets sur la végétation pouvaient être observés de manière quotidienne. Plus tard, la domestication animale a accru la production de résidus organiques par les groupes humains. Le lien entre ces résidus et des possibilités de récolte améliorées étant établi, des modes de gestions rudimentaires des résidus se sont vraisemblablement mis en place, avec une grande diversité concernant la fréquence et la répartition des dépôts sur les espaces occupés autour des habitats. Ces modes de gestion ont participé à l'émergence d'une véritable économie agricole. L'enjeu de l'utilisation des « matières fertilisantes » disponibles végétales, animales ou humaines, s'est imposé à la conscience des agriculteurs: participer à une amélioration de l'espérance de récolte, en quantité, en qualité et en régularité dans l'espace et dans le temps.

Cet enjeu productif des matières fertilisantes disponibles a été associé à toute forme d'agriculture passée, comme en témoignent divers traités d'agriculture de l'Antiquité (El Faiz, 1997), du Moyen Âge (Bolens, 1972), de l'époque pré-industrielle (Duhamel du Monceau, 1762), de l'entrée dans l'anthropocène (Boulaïne, 1995a, 1995b) (encadré 1.1). Il reste essentiel dans le cadre des agricultures modernes, qui font un large appel aux engrais de synthèse, mais il n'est plus le seul. L'accentuation du caractère concurrentiel de la production agricole entre producteurs, l'émergence des préoccupations environnementales, la prise de conscience du caractère limité des ressources nécessaires à l'élaboration des intrants, le besoin accru de sécurité sanitaire et nutritionnelle pèsent désormais sur tous les actes relatifs à la conduite des systèmes de production végétale, dont ceux dédiés à la valorisation des matières fertilisantes.

Encadré 1.1

Extraits du « Rapport d'un délégué à l'Exposition universelle de Paris en 1878 », rédigé par un viticulteur et tonnelier, originaire de Saône-et-Loire.

... Dans une autre conférence on nous a développé les moyens de faire de bons engrais; car personne n'ignore que c'est le principal actif qui agit sur les terrains et donne de bonnes récoltes abondantes; il y a deux sortes d'engrais, l'engrais de ferme et l'engrais chimique; mais c'est surtout le fumier qui est le plus usité dans nos pays, il s'agit donc de le savoir soigner et d'employer, afin qu'il produise efficacement. Il ne faut pas le laisser, comme font beaucoup de fermiers, au milieu d'une cour où il est sans cesse retourné par les poules et la pluie qui tombe dessus le lave et finit par entraîner tout le suc qu'il contenait, il n'y reste plus qu'un corps gras auquel il manque en partie ou en totalité les quatre principaux éléments qui font sa force, le carbone, l'hydrogène, l'oxygène et l'azote. Les moyens à employer sont très faciles à faire, il s'agit tout simplement de mettre le fumier dans une fosse bien cimentée, à côté

une deuxième fosse pour recevoir le purin qui s'écoule et en arroser votre fumier tous les huit jours.

La culture de la vigne demande pour engrais du fumier de ferme, mais on peut le remplacer ou l'ajouter par de la potasse, car il paraît que c'est cette matière qui conviendrait le plus à la vigne en fait d'engrais chimique.

D'après M. Georges Ville, exposant primé à l'exposition, chaque culture à son engrais chimique qui lui est propre; ainsi la betterave, le colza, le froment, l'avoine et la prairie demandent de l'azote; le trèfle, la luzerne, la pomme de terre, la vigne, c'est la potasse qui leur convient; le phosphate de chaux conviendrait pour le maïs et la chaux pour les terres des prairies humides et froides.

Telles sont mes impressions que je rapporte de mon séjour à l'Exposition...

Chanus François
Délégué du Canton de Tramayes
Commune de Pierreclos,
Le 1^{er} décembre 1878

C'est à partir d'une prise en compte simultanée de ces différents enjeux que se raisonnent désormais les pratiques associées à la fertilisation, à l'échelle des parcelles, des exploitations agricoles, et que se dessinent les prémisses d'une gestion des nutriments à l'échelle des territoires (Pellerin *et al.*, 2014).

La diversité des connaissances, des savoir-faire, des techniques nécessaires au raisonnement de la fertilisation et à sa mise en œuvre, est aujourd'hui plus importante que lors de la parution du premier *Guide* en 2005. Nous introduisons ci-dessous au contenu des différents

chapitres de l'ouvrage qui abordent cette diversité, sous la bannière des grands enjeux associés à la fertilisation des cultures auxquels ils se réfèrent principalement.

A. Enjeux productifs de la fertilisation

Par enjeu productif, on considère ici les effets possibles de l'apport de matières fertilisantes sur la production physique par les plantes de matières d'intérêt, qu'il s'agisse de produits destinés à l'alimentation, la fourniture de fibres, d'énergie², ou encore de substances ou molécules diverses (plantes à parfum ou médicinales par exemple).

Les multiples rôles des éléments nutritifs dans la production végétale peuvent être appréhendés à diverses échelles biologiques. En simplifiant, ils peuvent se décliner depuis les processus d'acquisition des nutriments par les parois des cellules racinaires, jusqu'aux phénomènes de transferts et d'accumulation de biomasse vers les organes d'intérêt, dans les plantes qui constituent les couverts végétaux mono ou plurispécifiques. Une grande diversité d'approches et de disciplines scientifiques est donc requise pour rendre compte de ces rôles dans le fonctionnement végétal³. Le chapitre 3 fait un rappel des principaux rôles physiologiques ou éco-physiologiques des éléments nutritifs, à l'échelle de la plante entière ou du peuplement cultivé.

D'un point de vue agronomique, diverses approches ont été développées historiquement pour apprécier de manière plus pragmatique à l'échelle des parcelles agricoles, les effets des apports de matières fertilisantes et amendantes sur la production.

1. Approches de l'effet quantitatif de la fertilisation sur la production

Ces approches sont abordées dans les diverses grandes parties de l'ouvrage. Ce paragraphe en fait une synthèse introductive.

Outre la simple comparaison des résultats productifs obtenus sur des zones voisines fertilisées/non fertilisées, quatre grandes familles méthodologiques sont apparues successivement :

- l'établissement des fonctions de production ;
- l'analyse en composantes du rendement ;
- une approche éco-physiologique simplifiée ;
- la modélisation mécaniste des couverts végétaux cultivés.

Ces approches ont donné chacune naissance à de multiples variantes méthodologiques, qui intègrent des indicateurs de réponse des plantes, de l'offre du sol en nutriments et des apports d'engrais variés. Elles ne se sont pas substituées les unes aux autres. Aujourd'hui encore elles peuvent être utilisées de concert dans le cadre du développement ou du test d'une nouvelle matière fertilisante, ou d'une stratégie de fertilisation innovante, en fonction de leurs coûts et temps de mise en œuvre. Les deux premières ont plus une valeur révélatrice et démonstrative pour les producteurs et autres parties prenantes, alors que les deux dernières ont plus une valeur explicative des effets constatés.

Ces diverses méthodes d'analyse des effets de la fertilisation portent sur des résultats acquis expérimentalement. De manière très générale, les essais au champ ont été et sont encore conduits de manière comparative. La production de cultures fertilisées à diverses doses et/ou divers produits est comparée à celle d'une situation de référence non fertilisée ou, de

2. Les Anglo-Saxons agrègent les quatre grands types de produits agricoles issus de la production végétale sous l'acronyme FFFF pour *Food, Feed, Fiber, Fuel*. Les Néerlandais ajoutent *Flower* et *Farmacy*... et d'autres encore pour hiérarchiser les marges économiques et la valeur de chaque production.

3. À l'échelle longue de l'histoire de la terre, les disponibilités en nutriments ont contraint l'évolution des organismes autotrophiques, micro-organismes ou plantes. C'est particulièrement le cas du phosphore, considéré à cette échelle de temps comme le principal facteur nutritionnel limitant et régulateur de la diversification des formes de vie (Raven, 2013).

manière plus récente, fertilisée ou non fertilisée⁴ selon des préconisations issues d'un processus de diagnostic portant sur les niveaux des disponibilités en nutriments en début d'expérience et de calcul de besoin, processus faisant lui-même référence à un moment donné (chapitre 7.IV).

a. Établissement de courbe de réponse de la production à la fertilisation

L'établissement de courbe de réponse est basé sur la comparaison de l'effet de quantités croissantes d'engrais appliqués au champ sur une même culture, ou sur celle des offres en nutriments du sol différenciées par ces quantités. D'innombrables expérimentations ont été conduites, particulièrement dans le cas de l'azote (N). Pour cet élément, la relation entre le rendement de la plupart des grandes cultures et le niveau de l'offre présente un caractère croissant continu et monotone, suivi d'une décroissance en cas d'excès. Ce caractère permet *a posteriori* de calculer, de diverses manières, la dose la plus faible procurant le rendement le plus élevé, la dose donnant la marge brute maximale, ou la dose identifiée sur la base d'un coût (de fertilisation) marginal compensé par un profit marginal (obtenu par la vente du surplus de récolte) au moins équivalent.

Le très grand nombre de courbes de réponse à la fertilisation azotée obtenues expérimentalement a suscité différents types d'exploitation statistique dans l'espoir de cerner les doses d'engrais les plus rentables dans différents contextes (Makowski *et al.*, 2001). Mais les courbes de réponse sont très dépendantes du niveau des disponibilités présentes dans les sols, ainsi que de multiples facteurs édaphiques, climatiques et cultureux (espèces et cultivars choisis, niveau de protection sanitaire..., comme détaillé plus loin dans le paragraphe II.A.2).

L'étude historique de Meynard *et al.* (1983) menée en Champagne avait révélé la grande variabilité de la réponse du blé à la dose d'azote, dans des sols très semblables et sur des précédents identiques. Ces courbes ne peuvent donc pas être utilisées comme seule base de raisonnement de la fertilisation azotée. Elles ont été associées à l'établissement d'un bilan d'azote prévisionnel quelques années après sa mise au point (Remy-Hebert, 1977). Un tel bilan vise à établir le niveau des disponibilités en N du sol susceptibles de bénéficier à la culture, sur l'ensemble de son cycle (chapitre 7.IV.A). Aujourd'hui, les méthodes de conseils en fertilisation azotée reposent sur ce couplage, l'effet des facteurs édaphiques étant intégré dans l'évaluation des différents postes du bilan.

Dans le cas du phosphore et du potassium, l'établissement des courbes de réponse s'effectue essentiellement en fonction du niveau des disponibilités présentes dans les sols, plutôt qu'en fonction des doses d'apports les plus récentes (chapitre 7.III, 7.IV.C et D). Des milliers d'expérimentations de longue durée ont conduit à différencier le niveau des disponibilités en P ou K, ou les deux à la fois, dans de nombreuses situations pédoclimatiques à partir de la Seconde Guerre mondiale sur les différents continents⁵, par l'application de plusieurs régimes de fertilisation dans le temps, afin d'établir *a posteriori* de telles courbes. Chaque pays utilise sa ou ses méthodes d'extraction des « réserves » de P ou K des sols (chapitre 7.III) disponibles pour les plantes. En France, les lycées agricoles ont contribué à fournir la matière à l'établissement de telles courbes (ministère de l'Agriculture DGER, 1985), avec l'aide de l'Institut national de la recherche agronomique (INRA) et de la Société commerciale des potasses d'Alsace (SCPA). Une première synthèse scientifique d'essais de longue durée a été établie par Gachon *et al.*, en 1988. Une autre synthèse réalisée par P. Castillon à la fin des années 1990 (ITCF, non publiée) a regroupé les résultats obtenus sur plus d'une centaine d'essais pluriannuels mis en place entre 1946 et 1996.

4. La préconisation peut consister à ne pas fertiliser. La notion d'impasse de fertilisation, ou de non-apport d'engrais (phosphatés ou potassiques), pendant une ou plusieurs années successives à venir, est présentée dans le chapitre 7.IV.C et D.

5. Voir sur les sites de l'Organisation des Nations Unies pour l'agriculture et l'élevage (FAO) les « reports » d'expérimentation de fertilisation conduits pour un grand nombre de cultures sur tous les continents.

Ces travaux de synthèse avaient pour objectif principal commun de faire apparaître des seuils de disponibilités des éléments dans le sol, au-delà desquels une réponse positive à un apport récent d'engrais avait peu de chance de se manifester, dans le plus grand nombre de situations pédoclimatiques et culturales possible. Ces seuils étaient considérés comme les teneurs limites au-delà desquelles il n'était pas nécessaire d'enrichir les sols, pour utiliser une terminologie française de l'époque. Pour cela, des modèles d'ajustement mathématiques divers⁶ ont été utilisés sachant que la réponse des cultures à l'augmentation des disponibilités en phosphore ne présente pas un caractère continu comme dans le cas de l'azote, mais une courte phase d'augmentation rapide, suivie d'une phase de non ou très faible réponse. Les résultats issus de ces travaux, parfois remis à jour à l'occasion de synthèses portant sur le petit nombre d'essais de longue durée encore en place (Colomb *et al.*, 2007a et 2007b), sont toujours à la base des diagnostics de fertilité (chapitre 7.III, IV.C et D) conduits à partir des analyses de terre. Certains essais de longue durée terminés participent encore à la mise au point de nouvelles méthodes d'approche diagnostique du phosphore biodisponible (calibrage) grâce aux échantillons de terre prélevés au cours de leur cycle de vie et conservés en terrathèque. Les travaux conduits dans le cadre du Compte d'Affectation Spéciale Développement Agricole et Rural (CASDAR) « Raisonement Innovant de la fertilisation phosphatée » illustrent le recours à des courbes de réponses obtenues en conditions initiales de déficience, pour rendre compte de l'intérêt de nouvelles approches du niveau des disponibilités phosphatées dans les sols, pour diverses cultures (Denoroy *et al.*, 2012).

b. Approche des effets de la fertilisation sur les composantes de rendement

L'approche repose sur une décomposition de la biomasse récoltée par unité de surface en composantes explicatives. Dans le cas d'une culture annuelle à graines, la formulation la plus simple et la plus usuelle du modèle sera :

$$\text{Rdt} = k \times \text{Ng} \times \text{Pg}$$

Avec :

Rdt: rendement ou niveau de production par unité de surface.

Ng: nombre de grains produits par unité de surface.

Pg: masse moyenne d'un grain.

k: coefficient dépendant des unités de surface et d'expression du rendement ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$...).

Le nombre de grains par unité de surface peut lui-même être segmenté en plusieurs sous-composantes. Dans le cas d'un blé, le nombre de grains par unité de surface est déterminé par le nombre d'épis observé sur cette unité, le nombre d'épillets par épi et le nombre de grains par épillet :

$$\text{Rdt} = k \times \text{Népi} \times \text{Népillet/Épi} \times \text{Ng/épillet} \times \text{Pg}$$

Dans le cas d'un maïs, dont les variétés modernes cultivées en Europe ne tallent pas, une formulation du modèle intègre le nombre d'épis par unité de surface (Népi) (dépendant de la densité de semis et du taux de levée), le nombre de rangs (Nrang) par épi, le nombre de grains (Ngr) par rang et le poids d'un grain (Pg) :

$$\text{Rdt} = k \times \text{Népi} \times \text{Nrang} \times \text{Ngr} \times \text{Pg}$$

Les composantes de la production d'une culture se mettent en place à des périodes particulières du développement du couvert. Elles sont donc sensibles au niveau de disponibilités en nutriments et aux conditions environnementales durant ces périodes. Faciles à mesurer, elles constituent de bons indicateurs des effets du niveau des disponibilités en nutriments à différentes époques ou stades de développement des cultures (chapitre 3.III). Les informations obtenues permettent de préciser les processus végétaux impactés par les déficiences nutritionnelles et de mieux raisonner les apports d'éléments nutritifs, en les fractionnant éventuellement comme dans le cas de l'azote (chapitre 7.IV.A).

6. Modèle bilinéaire avec plateau, modèle monotone quadratique... (voir le chapitre 7.III).

c. Approche simplifiée des effets de la fertilisation sur l'accumulation de biomasse issue de la photosynthèse

Cette approche est basée sur le fait qu'un couvert végétal intercepte une partie des rayonnements solaires incidents grâce à son système foliaire et, par le biais de la photosynthèse, convertit une fraction de l'énergie capturée en biomasse végétale (chapitre 3), dont une partie présente un intérêt marchand pour l'agriculteur. Une formulation simplifiée dérivant de l'approche de Monteith (1977) s'écrit :

$$\text{Rdt} = \text{PARa} \times \text{RUE} \times \text{IR}$$

Avec :

Rdt: rendement de la culture en g de biomasse par unité de surface.

PARa: rayonnement photosynthétique absorbé par le couvert (MJ par unité de surface) sur l'ensemble du cycle cultural. Ce n'est qu'une fraction du rayonnement incident, dépendante de l'importance du système foliaire développé par le couvert au cours de son cycle de développement de l'émergence à la récolte.

RUE: coefficient de conversion du rayonnement intercepté en biomasse aérienne totale produite par le couvert (g.MJ⁻¹).

IR: indice de récolte, traduisant la proportion de la biomasse totale correspondant à la biomasse de la partie récoltée.

Ce type de modèle s'est avéré très utile pour comprendre l'effet des déficiences en azote ou en phosphore sur de nombreuses cultures annuelles⁷. Il est utilisé plus généralement pour comparer, de manière synthétique, la capacité des espèces cultivées (ou de leurs variétés) à capturer le rayonnement solaire et le convertir en biomasse, dans des conditions de croissance optimales ou plus ou moins contraintes par le niveau des ressources disponibles (eau, nutriments, lumière).

d. Modèles mécanistes de transfert d'éléments entre sol et plante, de croissance et de production des plantes

Au début des années 1980 sont apparus aux États-Unis les premiers modèles de transferts des éléments entre les sols et les couverts végétaux conçus pour rendre compte des problèmes environnementaux importants apparus à l'échelle de vastes écosystèmes anthropisés: érosion, tassement, salinisation, flux d'azote et de phosphore dégradant la qualité des eaux de surface, dégradation du statut organique des sols. EPIC (Williams *et al.*, 1995) est l'un des modèles les plus représentatifs de cette génération. D'autres modèles sont apparus pour simuler les transferts d'éléments entre sol et couverts végétaux avec des préoccupations plus agronomiques. APSIM (Keating, 2003), CERES (Jones & Kiniry, 1986), CROPSYST (Stöckle *et al.*, 2003), DAYSIM (Hansen *et al.*, 1990), DSSAT (Jones *et al.*, 2003), WOFOST (Supit *et al.*, 1994) sont parmi les plus utilisés au niveau international. Ils permettent de simuler, avec un pas de temps généralement quotidien, le développement des couverts cultivés en fonction des disponibilités en lumière, en température, en eau, en azote et parfois en phosphore. Plus ou moins génériques par les cultures concernées, ils permettent de produire des références agronomiques quant à leurs possibilités de réponses dans des situations très diverses plus ou moins contraintes par le niveau des ressources disponibles. Deux exemples de modèles mis au point par des équipes de recherche françaises aident à préciser leur capacité de simulation et leur intérêt pour le raisonnement de la fertilisation ou la production de références nécessaires à celui-ci.

Le modèle STICS (Brisson *et al.*, 1998) est capable de modéliser le développement de nombreuses cultures monospécifiques ou plurispécifiques (prairies) grâce à des possibilités de paramétrage appropriées, en fonction des ressources en rayonnement, eau et azote à l'échelle d'une succession culturale. Il utilise en entrée des données climatiques journalières, des caractéristiques des sols décrits sur plusieurs horizons, les pratiques culturales. En sortie, STICS délivre le niveau de production et la qualité des organes récoltés en fonction de la

7. À titre d'exemple, elle a permis de montrer (Plénet *et al.*, 1998) qu'un déficit de rayonnement absorbé apparaît précocement en cas de déficience en P chez le maïs. Cela tient au fait que celle-ci ralentit le rythme d'apparition et la vitesse d'expansion des feuilles. Les mêmes travaux ont montré que les effets du niveau des disponibilités en phosphore sur le coefficient (RUE) de conversion du rayonnement absorbé en biomasse aérienne du maïs ou sur l'indice de récolte (IR) sont très limités, voire négligeables. La déficience en P joue de manière primordiale sur le déploiement précoce du système foliaire.

nature des plantes (teneur en sucre, en huile, en matières azotées digestibles [MAD]...). Il émet un ensemble de données propres à fournir un bilan environnemental pour chaque cycle cultural (consommation d'eau, quantité de nitrates lixiviés, émission de N_2O). À l'échelle parcellaire, STICS est utilisé pour réaliser du diagnostic agronomique de pratiques culturales variées: irrigation, fertilisation azotée (chapitre 7.IV.A), travail du sol, cultures intermédiaires, ou du diagnostic environnemental, portant, par exemple, sur l'impact d'itinéraires techniques sur les flux sortant d'azote de la parcelle cultivée (Houlès, 2004).

Le modèle AZODYN (Jeuffroy *et al.*, 2001) fonctionne aussi à l'échelle d'une zone homogène d'une parcelle agricole, avec un pas de temps journalier, du semis à la récolte de la culture. Comme STICS, il simule la production de biomasse en fonction du rayonnement intercepté *via* le formalisme de Monteith (1977) déjà évoqué. Il est en mesure de simuler les effets des stress liés à la température, à l'importance du rayonnement photosynthétique solaire, aux disponibilités en eau, et en azote au jour le jour, et les conséquences sur le rendement et la teneur en protéines des récoltes. Des déclinaisons du modèle existent pour diverses cultures. Il a été adapté (AZODYN org, David *et al.*, 2005) pour une utilisation en agriculture biologique, en intégrant un module simulant la dynamique de minéralisation des engrais organiques et en tenant compte des effets des adventices, susceptibles de réduire l'efficacité d'utilisation de l'azote.

La simulation des transferts de phosphore entre le sol et les plantes a fait l'objet de nombreux travaux de modélisation, sur des périodes de plus en plus longues du développement végétatif des plantes. Toutefois, peu de modèles à vocation agronomique sont capables de simuler ces transferts sur le développement complet des plantes, depuis leur levée jusqu'à la récolte, tels que l'ont proposé Jones *et al* (1984) dans le cadre du modèle EPIC. Le modèle FUSSIM_P Maïs (Mollier *et al.*, 2008) simule la croissance et le prélèvement de P par le maïs durant sa croissance végétative, en fonction des disponibilités en P du sol. Le modèle CyP (Morel *et al.*, 2011) permet de simuler l'évolution de la disponibilité du P du sol pour les plantes en fonction du type de sol et du bilan pluriannuel de P.

Actuellement, on dispose d'une batterie de modèles prédictifs de la réponse de nombreuses cultures aux niveaux des disponibilités en azote, tenant compte des interactions avec les autres facteurs de croissance (eau, température et rayonnement), utiles pour tester des scénarios de fertilisation, en complément des expérimentations au champ (chapitre 7.IV.A). Pour le phosphore, des travaux sont encore nécessaires pour aller au-delà de la prévision de la réponse des plantes durant la croissance végétative, jusqu'à la phase finale de remplissage du grain.

À noter aussi que ces modèles simulent tous la production de biomasse aérienne ou racinaire des couverts. En tenant compte de la destination des parties non récoltées (enfouies ou brûlées), ils peuvent contribuer à l'appréciation de l'effet des systèmes de cultures sur le statut organique des sols. Certains d'entre eux ont été conçus initialement pour cet objectif particulier tels que Century (Parton *et al.*, 1994), ROTH (Coleman *et al.*, 1996) évoqué dans le chapitre 5.I, ou encore le modèle AMG (Duparque *et al.*, 2013) présenté en détail dans le chapitre 6.II dédié à la gestion du statut organique des sols.

2. Efficience productive de la fertilisation

L'efficacité de la fertilisation appliquée à une culture s'apprécie grâce aux rapports entre les quantités d'éléments prélevés par celle-ci sur les quantités d'éléments apportés.

Divers indicateurs d'efficacité peuvent être utilisés. Les coefficients d'utilisation apparents (CAU) ou réels (CRU) sont couramment mobilisés par les agronomes, à l'échelle des couverts végétaux pour comparer des stratégies de fertilisation. Les coefficients réels d'utilisation de l'azote et du phosphore peuvent varier dans de larges limites (chapitre 7.IV.A

et C). Les sources de variations sont nombreuses et peuvent relever de la présence d'un ou plusieurs facteurs limitant⁸ la production :

1. forme, date, quantité d'apport ou modalités de localisation de la fumure inadéquates ;
2. fertilisation ou disponibilités en nutriment déséquilibrées ;
3. insuffisance de disponibilité en eau permettant l'absorption des nutriments ;
4. inadaptation de l'état structural ou acido-basique du sol ;
5. choix de variété, date ou densité de semis inappropriés ;
6. concurrence due à l'enherbement et dysfonctionnements exercés par les bioagresseurs (réduction de surface foliaire et/ou de l'extension racinaire).

Les études manquent pour hiérarchiser précisément ces sources, de façon statistique. Toutefois, à dire d'experts de terrain, les sources 1, 4, 5 sont parmi les plus fréquentes et les plus dommageables pour l'azote dans le cadre des systèmes de grandes cultures spécialisés du nord de la France. Dans les régions méridionales non irriguées s'ajoute fréquemment l'insuffisance des ressources en eau, à des moments cruciaux pour la mise en place d'une ou plusieurs composantes de rendement. Dans les systèmes biologiques, le développement des ravageurs (source 6) peut être un facteur important limitant la valorisation des autres facteurs de production, de même que le choix d'une variété inadaptée par son potentiel ou sa rusticité (source 5) dans son contexte de culture.

Pour le phosphore, la cause principale de mauvaise efficacité d'utilisation relève essentiellement de la source 1, du fait de la faible mobilité des ions phosphates dans le sol (chapitre 5.IV), des problèmes de solubilité des phosphates des engrais en fonction de la réaction du sol, de la répartition des engrais par rapport aux racines dans les sols présentant de faibles disponibilités. Les limitations de l'extension racinaire induites par des problèmes de structure du sol (source 4) sont aussi fréquemment responsables d'une mauvaise valorisation des disponibilités en phosphore (chapitre 6.I et IV).

Les déséquilibres alimentaires (source 2), plus rares, concernent principalement le potassium et le magnésium (Mg), pour lesquels divers cas d'antagonisme peuvent être observés au champ (c'est-à-dire excès de K vis-à-vis de Mg et vice versa, chapitre 5.V et VI). Des cas de mauvaise nutrition azotée ont été observés sur du maïs déficient en phosphore, probablement par défaut d'extension racinaire (P. Denoroy INRA, communication personnelle). Les carences ou toxicité oligominérales (chapitres 5.VIII et 7.IV.E), bien que peu fréquentes à l'échelle du territoire, peuvent obérer le développement des cultures et diminuer l'efficacité des autres facteurs de production. Ces carences et toxicités oligominérales peuvent être induites par un statut acido-basique des sols inadapté (chapitres 5.VII et 6.III).

À l'échelle des parcelles⁹, un facteur d'efficacité¹⁰ important est l'adéquation des apports (en quantité, en nature) par rapport aux prescriptions agronomiques (chapitre 9.II), et leur régularité d'épandage au sein d'une zone de parcelle jugée homogène vis-à-vis du besoin

8. Sous sa forme initiale, la loi du facteur limitant énonce que le rendement d'une culture est limité par celui des éléments fertilisants qui le premier vient à manquer (Liebig, vers 1850). Sous son acceptation élargie, elle énonce que le résultat d'une chaîne de processus (conduisant ici à la production d'une culture) est limité par le chaînon le moins performant et que c'est sur lui qu'il faut agir pour lever la limitation. Ainsi, les disponibilités d'un élément nutritif dans le sol peuvent être suffisantes, mais un état structural du sol peut en limiter l'utilisation par les systèmes racinaires.

9. L'efficacité de la fertilisation peut être analysée à des échelles de production plus vastes, régionales, nationales ou supranationales (Cassman *et al.*, 2002) ; (Lassaletta *et al.*, 2014). Toutefois, à ces échelles, il s'agit plus d'étudier de manière comparative l'efficacité et l'efficacité des systèmes de production agricole que celles des actes de fertilisation pris isolément. L'examen des méthodes et indicateurs utilisés à cette fin sort du cadre de ce *Guide* et n'y est donc pas développé.

10. Mais aussi d'efficacité, rapport entre les résultats obtenus (rendement réel d'une culture) et les moyens pris pour les obtenir (quantité d'azote apportée par exemple).

en éléments fertilisants¹¹. Le chapitre 8.I présente la diversité des matières fertilisantes disponibles, et leurs principales caractéristiques qui doivent présider aux choix des agriculteurs, en fonction de leurs systèmes de culture, des conditions pédoclimatiques et de l'état de fertilité des parcelles. Le chapitre 8.II expose l'état des systèmes techniques disponibles pour procéder à l'épandage des matières fertilisantes minérales ou organiques solides et liquides, en mettant l'accent sur les nouveaux dispositifs de pilotage des débits pour réguler les apports.

3. Enjeux de la fertilisation vis-à-vis de la qualité de la production

La notion de qualité de la production renvoie à des ensembles de caractéristiques très différentes touchant à la pureté/homogénéité de la récolte, à son aptitude à la conservation, à sa composition chimique ou nutritionnelle, à ses propriétés technologiques intéressantes les transformateurs. S'ajoutent encore les aspects sanitaires et gustatifs ou simplement l'aspect des produits (pour les fruits et légumes en particulier) qui déterminent l'acte d'achat par les consommateurs. Les caractéristiques souhaitées peuvent être différentes selon les marchés visés. Elles sont évolutives au cours du temps. De nombreux facteurs relevant du contexte ou des itinéraires techniques de culture peuvent influencer sur la qualité de la production. Compte tenu de ce qui précède, il n'est pas possible de discerner une progression historique générale concernant les démarches d'étude du « facteur nutritionnel » des cultures sur la qualité des produits, à l'instar de ce qui a été fait dans la partie précédente relative aux impacts quantitatifs de la fertilisation sur la production.

Pourtant, le rôle de la nutrition minérale, et donc de la fertilisation sur la qualité des récoltes, peut être déterminant pour la réussite économique des agriculteurs, la satisfaction des transformateurs et des consommateurs. Ce rôle est documenté dans le présent *Guide* au sein des chapitres relatifs au raisonnement des apports de nutriments pour les grandes cultures (chapitre 7.IV.A à E), prairies, arbres fruitiers et vignes (chapitre 7.V.A à C). Les stratégies de fertilisation tiennent compte de ce rôle. Ainsi, selon Le Souder (2014), le fractionnement en trois apports d'azote sur blé est la stratégie généralement la plus efficace pour viser à la fois des hauts rendements et des fortes teneurs en protéines. Pour cela un raisonnement des doses et dates d'apport – basé sur la méthode du bilan (chapitre 7.IV.A) et, dans la mesure du possible, sur le contrôle en végétation de l'état de nutrition azotée du couvert (chapitre 7.II.A et B) – est nécessaire. Les modèles tels que STICS et AZODYN-org (voir paragraphe II.A.1.d), par leur capacité à simuler l'accumulation d'azote dans le grain, permettent de tester des stratégies de fertilisation azotée, élaborées en partenariat avec les filières concernées afin de produire des références régionales¹². La méthode du bilan permet aussi de calculer au plus juste la fertilisation azotée des cultures pour lesquelles des plafonds de teneurs en azote des produits ne doivent pas être dépassés pour pouvoir correspondre aux critères industriels de transformation ou de valorisation (orge brassicole, betterave à sucre).

Concernant les prairies, les auteurs du chapitre 7.V.A soulignent que les relations entre niveaux de nutrition minérale et performances (production-qualité-pérennité) sont bien établies. Cependant, les relations entre les pratiques de gestion des prairies et l'état de nutrition des couverts sont entachés d'une forte incertitude¹³. C'est la raison pour laquelle les auteurs proposent une démarche de gestion adaptative de la prairie, où la fertilisation azotée tient lieu de levier essentiel mais non unique, de façon à répondre au calendrier des besoins quantitatifs et qualitatifs des animaux en fourrages. Rappelons que la teneur en protéines du fourrage peut être ajustée par le biais de la fertilisation azotée et/ou du taux de légumineuse dans la flore prairiale (chapitre 10.I). La démarche de gestion adaptative des prairies proposée peut intégrer des résultats issus de la méthode de

11. Une mauvaise estimation de l'hétérogénéité de l'offre en nutriments intraparcélaire peut être à l'origine de l'inadéquation des apports. La qualité du contrôle de fertilité périodique est ici déterminante (chapitre 9.I).

12. Des modèles de recherche, tel SiriusQuality2 (Marthe *et al.*, 2006), sont capables de simuler la composition des graines de céréales en composés protéiques (albumine-globuline, gliadine, glutenine...).

13. Cela tient à la complexité des interactions entre les plantes, le sol, le climat et les modes d'exploitation appliqués aux prairies.

raisonnement de la fertilisation azotée des prairies plus normative présentée dans le chapitre 7.V.A, basée sur la méthode du bilan.

La fertilisation joue un rôle important dans la formation du rendement attendu des vergers et la qualité des fruits¹⁴. L'aptitude à la conservation, l'aspect et les propriétés gustatives des produits sont des critères de qualité qui conditionnent la rentabilité des vergers. Si les déficiences en éléments majeurs ou mineurs (bitter-pit des pommes) peuvent pénaliser la récolte, les excès d'azote sont à craindre, car potentiellement dommageables, par altération de l'aptitude à la conservation, la teneur en sucre des fruits et/ou une sensibilisation à des maladies fongiques (chapitre 7.V.B).

Le chapitre 7.V.C rappelle que les besoins de la vigne en éléments minéraux sont relativement faibles et qu'un excès d'alimentation minérale peut provoquer des problèmes qualitatifs importants, tant sur le raisin de table que de cuve. Les déficiences en nutriments sont donc peu fréquentes, sauf dans les situations peu fertiles. Les pratiques de fertilisation et d'apports d'amendements organiques sur vigne sont contraintes par les risques d'excès qui, outre la diminution de qualité organoleptique, peuvent entraîner des risques sanitaires pour les consommateurs.

B. Enjeux environnementaux

Les enjeux environnementaux de la fertilisation présentés essentiellement dans le chapitre 2.II sont de nature variée, et se posent à diverses échelles de temps et d'espace. Ils portent sur les effets induits par l'usage des matières fertilisantes sur la composition chimique des différents compartiments de l'écosphère¹⁵ (sol, air, eau), avec des conséquences possibles directes sur les êtres vivants, ou indirectes *via* une contribution au changement climatique notamment. Les causes de ces effets sont à rechercher dans les traits fondamentaux des cycles biogéochimiques propres aux divers éléments, détaillés dans le chapitre 5.I à VIII. Les risques d'émission de nutriments hors des parcelles cultivées¹⁶, dans les couches profondes de sol et au-delà vers les nappes phréatiques et aquifères, dans les eaux de surface, dans l'air, ne sont évidemment pas les mêmes selon le degré de mobilité des éléments dans le sol et les possibilités de volatilisation de certains composés dans l'atmosphère.

Plusieurs chapitres du *Guide* évoquent les effets aggravants ou réducteurs sur ces risques des pratiques de fertilisation (chapitre 7.IV.A et C), des modalités de travail du sol (lien entre érosion et migration de P par exemple), des systèmes de cultures (chapitres 6.I et 10.I à IV).

Aux risques de pollutions susceptibles de conduire à des dégradations pour la biosphère s'ajoutent désormais les questions relatives à la consommation des ressources primaires énergétiques non renouvelables (c'est-à-dire gaz naturel pour la fabrication des engrais azotés) (chapitre 8.I.C) ou minières (gisement de phosphates, de potasse...) (chapitres 2.II.E et 7.IV.C) pour répondre à la demande d'engrais en agriculture.

L'évaluation des risques environnementaux associés aux pratiques de fertilisation a fait l'objet de nombreux travaux, conduisant à la production d'un grand nombre d'indicateurs, à diverses échelles d'approche. Les démarches et outils qui les intègrent se distinguent par la nature

14. La compréhension des déterminants génétiques, environnementaux et culturaux de la qualité des fruits est difficile. Des travaux de modélisation (tel « Fruit Virtuel », Génard *et al.*, 2007) visent à simuler la croissance du fruit, l'évolution des teneurs en matière sèche et celles des principaux sucres et acides, ainsi que le niveau de maturité du fruit, sous l'influence de ces déterminants. L'utilisation de ce type de modèle pour raisonner les itinéraires techniques des vergers et les actes de fertilisation est l'objet de recherches actives (INRA, Avignon).

15. L'écosphère désigne l'ensemble formé par la biosphère, la lithosphère et l'atmosphère.

16. Les transferts hydrologiques et de nutriments à l'échelle des paysages, de même que les possibilités d'intervention des agriculteurs sur ces transferts (création et gestion de fossés, de haies, bandes enherbées, zones humides artificielles, affectation culturale du parcellaire...) ne font pas l'objet d'un chapitre particulier dans cet ouvrage. Le lecteur se reportera aux ouvrages, synthèses ou sites relatifs à cette problématique générale, ou dédiés spécifiquement à la gestion des flux d'azote ou de phosphore pour améliorer la qualité de l'eau à l'échelle des paysages. Deux exemples: <http://www.openfluid-project.org/index.php?page=about&lang=fr>; <http://coclickeau.webistem.com/bac/>

Fonctionnement du peuplement végétal et besoins en nutriments

Lionel Jordan-Meille (INRA, Bordeaux Sciences Agro)

Points essentiels

Outre le carbone, l'oxygène et l'hydrogène, les plantes ont besoin d'une quinzaine de minéraux, parmi lesquels des « majeurs » et des « oligos », des indispensables stricts ou relatifs, des partiellement substituables, etc. Les éléments les plus limitants ne sont pas forcément ceux qui sont les moins présents dans les sols. Les besoins en éléments sont spécifiques à un végétal donné, évoluent selon le stade de développement et sont soumis aux principaux facteurs de croissance. Prélèvements, besoins, exigences sont des notions bien complémentaires, qui impliqueront des stratégies de fertilisation adaptées au cas par cas. La « demande » en minéraux est assurée par le prélèvement dans la solution du sol; la remobilisation interne à la plante, pour les minéraux mobiles, permet d'assurer une certaine plasticité face aux fluctuations de l'offre. Le prélèvement dépend essentiellement de la surface du système racinaire et repose à la fois sur les flux de transpiration et sur ceux de diffusion. Une part de la croissance des racines dépend du sol (distribution verticale des minéraux) et de l'environnement dans lequel la plante est placée (micro-climat, compétition inter-spécifique). La plasticité de la croissance racinaire permet en général aux couverts de bien optimiser l'utilisation des ressources du sol. Il existe cependant des cas où la

nutrition minérale est insuffisante. Les cas de déficiences ou de carences peuvent être causés par la rareté d'une ressource ou par un blocage de son transfert entre le sol et la surface de la racine. Dans un environnement chimique défavorable, la plante développe des réactions (changement de morphologie racinaire, excrétion de substances solubilisatrices...), qui atténuent généralement les effets négatifs des déficiences. Les carences touchent le plus souvent à deux mécanismes physiologiques « clés » : les mécanismes de conversion du rayonnement en biomasse (la photosynthèse) et l'élaboration de la surface foliaire, entraînant dans leur sillage baisse de production racinaire, affaiblissement de la plante, chute des rendements. Les situations de déficiences agronomiques ne se manifestent pas toujours pas une symptomatologie particulière. Lorsque c'est le cas, la reconnaissance des symptômes de carence se fonde sur quelques règles liées notamment à la mobilité des minéraux et à leur rôle physiologique, dont rendent bien compte des guides de carences. Toutefois, les possibilités d'interactions entre facteurs de croissance compliquent les diagnostics. Les mécanismes d'absorption des minéraux par les feuilles laissent peu d'espoir de corriger des carences, surtout en éléments majeurs.

I. Petit historique des sciences relatives à la nutrition minérale des plantes

Les connaissances actuelles sur la nutrition minérale des plantes, caricaturalement limitée à la triade d'éléments « N, P, K », nous font oublier qu'il y a quelques siècles, ce sont les éléments « Eau, Terre, Air » et même « Feu » qui étaient mis en avant comme précurseurs de croissance ! Comprendre qu'une plante absorbe l'azote par les racines, alors que ce gaz occupe 80 % de l'atmosphère, n'avait rien d'intuitif, de même que le fait de réaliser que l'oxygène produit lors de la photosynthèse était issu de la décomposition des molécules d'eau ! Le fait même de savoir que les plantes tirent une partie de leurs éléments constitutifs de l'air ou du sol n'a été vraiment compris qu'à la faveur des travaux de scientifiques du XVII^e siècle (Helmont, Mariotte...). Quant aux formes sous lesquelles les plantes prélevaient leur matière, là aussi, la théorie de l'humus (Wallerius, 1763) n'a été mise en échec qu'après des expériences

hydroponiques menées par Palissy (1560). Le rôle de l'humus ne fut réhabilité qu'au XIX^e siècle, lorsque l'on réalisa que les sels de potassium s'y stockaient pour partie et que l'on prit conscience de l'importance de la vie biologique des sols. Parmi les minéraux reconnus utiles à la croissance des plantes, l'azote fut un des premiers, notamment du fait de sa présence dans le salpêtre, un sel relativement abondant, également utilisé dans le domaine militaire, et dont les effets sur les plantes ont été reconnus assez tôt (Mariotte, XVII^e siècle).

L'encadré 3.1 relate les principaux événements qui ont jalonné l'histoire de la science de la nutrition des plantes, indissociable de la chimie agricole, et des processus industriels de fabrication des engrais. Si l'emploi de marnes (action sur le pH) et de fumier (action sur les minéraux) est une pratique ancestrale, déjà relatée du temps des Romains, la compréhension rationnelle des processus de nutrition minérale des plantes ne date que d'une période, somme toute très récente, centrée sur le XIX^e siècle.

Encadré 3.1

Principaux événements ayant jalonné l'histoire de la science de la nutrition des plantes

- 380 : Le sol fournit l'essentiel des substances nutritives (Aristote).
- 1580 : Rôle des sels minéraux (essentiellement salpêtre) (Palissy).
- 1600 : Les plantes tirent leurs ressources de l'eau (Van Helmont).
- 1700 : Premières expériences de mesures de transpiration, concluant au rôle dominant des gaz dans la nutrition des plantes (Hales).
- 1799 : Confirmation du rôle du phosphore en tant qu'élément indispensable (de Saussure).
- 1800 : Premières bases de la photosynthèse (échanges CO₂ contre O₂) (Senebier).
- 1804 : Fondements de la photosynthèse (Lavoisier, suivi notamment par de Saussure).
- 1810 : Utilisation des charniers de Waterloo à des fins de fertilisation phosphatée.
- 1829 : Loi du minimum (Sprengel).
- 1843 : Création d'un essai toujours en cours de fertilisations minérales à la station expérimentale de Rothamsted en Angleterre (Lawes).
- 1850 : Début de l'entretien – empirique – de la fertilité chimique des sols par différents types de fertilisants organiques (noir animal, noirs de sucrerie, et surtout Guano du Pérou).
- 1860 : Connaissances sur le cycle de l'azote, les processus microbiens liés à la nitrification (Boussingault).
- 1860 : Cultures en hydroponique, reconnaissance de l'utilité de la solution du sol et de l'absorption des minéraux par les racines (Knop, van Sachs).
- 1860 : Exploitation des premières mines de potasse en Allemagne.
- 1870 : Établissement des 3 éléments essentiels N, P, K, ouvrage *Théorie des fertilisants minéraux* (Justus van Liebig).
- 1870 : Exploitation des phosphates du Quercy.
- 1882 : Mise en évidence des bactéries symbiotiques fixatrices d'azote (Hellriegell).
- 1909 : Loi des rendements moins que proportionnels (Mitscherlich).
- 1910 : Découverte du procédé de fixation de l'azote atmosphérique en ammoniac, précurseur de la synthèse massive d'engrais azotés (Habert-Bosch).
- 1921 : Création de l'usine de fabrication d'ammonitrates à Toulouse.
- 1936 : Formulation d'une solution nutritive, toujours utilisée (Hoagland).
- 1938 : Découverte du rôle du molybdène comme micronutriment.
- 1954 : Découverte du rôle du chlore comme micronutriment (Broyer).
- 2050 : Fin annoncée des gisements de phosphates facilement extractibles.

II. Définition des minéraux indispensables à la croissance et au développement des plantes

A. Les plantes : essentiellement du C, O, H

Quatre-vingt-dix pour cent de la matière sèche d'une plante sont constitués de carbone (45 % à lui seul), d'oxygène et d'hydrogène (figure 3.1). Sous l'action de la photosynthèse,

le CO₂ atmosphérique et l'eau du sol fournissent ces minéraux dits « organiques ». Le fonctionnement de cette machinerie repose sur des capteurs/transformateurs nécessitant des protéines, des enzymes, des organites cellulaires particulièrement enrichies en minéraux plus « rares », tels que N, P, K... Ainsi, toute élaboration de matière, même essentiellement carbonée, ne se fait qu'en immobilisant de tels minéraux dont la « demande » est conditionnée en partie par les produits de la photosynthèse.

B. La liste des minéraux indispensables reste ouverte...

Pour le physiologiste, deux critères sont nécessaires pour qu'un élément minéral soit dit indispensable à la plante (Arnon et Stout, 1939) :

- une déficience de l'élément considéré ne permet pas à la plante d'accomplir un cycle complet (végétatif et reproductif) ;
- la déficience de cet élément et les symptômes spécifiques correspondants ne peuvent être corrigés que par l'apport de l'élément en question.

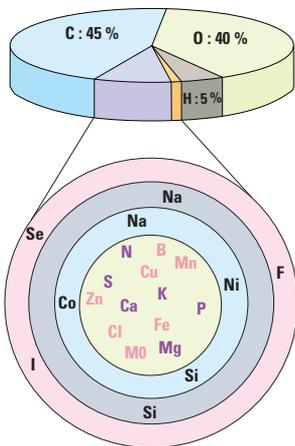
Aujourd'hui, ce sont 13 minéraux qui sont reconnus indispensables aux plantes (en dehors de C, H et O, figure 3.1 et tableau 3.1). Ils sont classiquement catégorisés en deux groupes :

- les éléments majeurs, présents à plus de 0,1 % dans la matière sèche (les plus abondants étant l'azote et le potassium, de l'ordre de 300 kg nécessaires à la production de 100 quintaux) ;
- les micronutriments (oligoéléments), dont les concentrations « normales » s'échelonnent de 1 ppm pour le molybdène (10 g dans 100 quintaux !) à 0,1 % pour le fer. Le chlore est le dernier élément dont le caractère indispensable a été démontré, dans le groupe des oligoéléments (Broyer *et al.*, 1954 ; White et Broadley, 2001).

C. Il y a aussi des minéraux spécifiquement indispensables...

Le sodium (Na) et le silicium (Si) ne sont pas indispensables à toutes les plantes et ne font donc pas partie de la liste « officielle », mais sont nécessaires, respectivement, pour les plantes de type photosynthétique C4⁷ (maïs, sorgho, canne à sucre) et pour le riz (Auréa AgroSciences, 2014 ; Kronzucker *et al.*, 2013 ; Epstein, 1994). Le cobalt est à la frontière entre le monde animal et végétal puisqu'il est utile à la bactérie rhizobium, présente dans les nodosités des racines de légumineuse et permettant l'assimilation d'azote gazeux. Le nickel est aussi cité dans certains travaux, mais son rôle reste encore incertain. Les travaux sur la rhizosphère et sur les échanges entre la plante et les micro-organismes vont certainement faire encore évoluer ce classement, à l'instar de la liste des planètes du système solaire...

En cultures fourragères ou alimentaires, il peut être intéressant d'apporter à la plante des éléments essentiels à l'animal qui les trouve ainsi dans sa ration. Des teneurs suffisantes (mais sans excès) en iode, fluor, et surtout sélénium, peuvent être des critères de qualité d'un fourrage, mais sans que ces éléments ne soient primordiaux au végétal (figure 3.1).



◀ **Figure 3.1:** Minéraux indispensables à tous types de plantes (centre), indispensables à certaines plantes (2^e cercle), non indispensables mais avec action positive sur la croissance (3^e cercle) et indispensables à la ration des herbivores (dernier cercle). Les chiffres dans le camembert sont exprimés en % de la matière sèche, en masse. En violet : majeurs, en orange : micronutriments.

7. Il existe principalement deux types de processus physiologiques permettant d'assimiler le carbone atmosphérique en sucres, qui se distinguent notamment par le nombre d'atomes de carbone fixés dans les premières molécules élaborées. Les plantes dites en « C3 » sont les plus courantes (blé, riz, oléoprotéagineux...), et les plantes en C4, apparues plus récemment dans l'évolution, sont aussi plus efficaces, représentées par exemple par le maïs ou la canne à sucre.

TABLEAU 3.1 : LISTE DES MINÉRAUX INDISPENSABLES EN PHYSIOLOGIE VÉGÉTALE, FORMES IONIQUES ABSORBÉES, CONCENTRATIONS EN ÉLÉMENTS TOTAUX DANS LES PLANTES ET LES SOLS (EN ppm ET %) DE SYSTÈMES FAIBLEMENT ANTHROPIÉS ET CLASSEMENT THÉORIQUE EN FONCTION DU CARACTÈRE LIMITANT (DU PLUS AU MOINS LIMITANT)*

	Abréviation	Concentrations dans les plantes		Concentrations dans les sols non anthropisés	Plantes/sols	Du plus au moins limitant (théorique)	
		Moyennes mg.kg ⁻¹	%	Fourchettes mg.kg ⁻¹			%
Molybdène	MoO ₂ ⁴⁻	0,1		[0,1-1]	2	0,1	14
<i>Nickel</i> *	Ni ²⁺	0,1		[0,1-10]	18,9 ¹	0,0	15
Cuivre	Cu ²⁺	6		[2-50]	12,9 ¹	0,5	8
<i>Sodium</i>	Na ⁺	10		[0-80 000]	20 ¹	0,5	7
Zinc	Zn ²⁺	20		[10-250]	58,6 ¹	0,3	10
Manganèse	Mn ²⁺	50		[10-600]	754 ²	0,1	12
Fer	Fe ²⁺	100		[20-600]	32 000 ²	0,0	16
Bore	B ³⁺	20		[0,2-800]	30	0,7	6
Chlore	Cl ⁻	100		[10-80 000]	> 400 ?	0,3	11
Soufre	S-SO ₄ ²⁻	0,1		[0,1-1,5]	250 ³	4	4
Silicium	H ₃ SiO ₄ ⁻	0,1		[0,1-10]	> 20 000 ?	0,1	13
Phosphore	H ₂ PO ₄ ⁻	0,2		[0,15-0,5]	400	5,0	3
Magnésium	Mg ²⁺	0,2		[0,05-1]	2 000 ⁴	1,0	5
Calcium	Ca ²⁺	0,5		[0,1-6]	12 000 ¹	0,4	9
Potassium	K ⁺	1		[0,8-8]	1 000 ⁴	10,0	2
Azote	NO ₃ ⁻ -NH ₄ ⁺	1,5		[0,5-6]	1 500 ¹	10,0	1

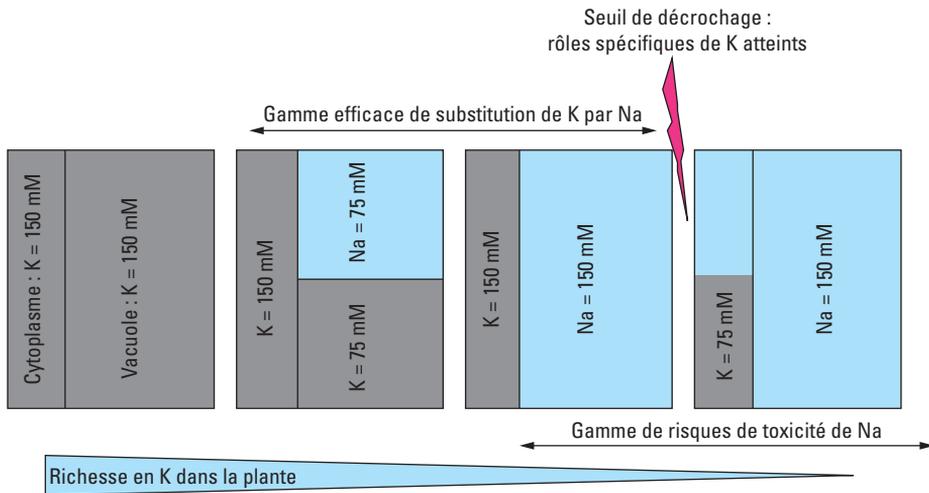
Sources : 1 : GISSOL, BDAT, INRA Orléans; 2 : ASPITET, Baize 2000; 3 : Machet *et al.*, 2009; 4 : Chapitres 5.V (K) et 5.VI (Mg) de cet ouvrage
 * Les minéraux en italique ne sont pas des minéraux classiquement reconnus comme indispensables, mais contribuent néanmoins indirectement à la croissance des plantes, comme substitutifs partiels d'autres minéraux ou comme facteurs de lutte contre les stress biotiques et abiotiques. Les teneurs en Ca concernent les sols non calcaires, celle en Na et Cl les sols non sodiques

D. D'autres minéraux dont les plantes se passent mais dont la présence peut se révéler positive

Le sodium et le silicium (encore eux) font aussi partie de ces éléments dont l'absence n'est pas forcément pénalisante, mais dont la présence est connue pour améliorer certaines fonctions de la croissance. Par exemple, dans le cas du silicium, pour lequel Epstein (1994) parle « d'anomalie » en raison de son importance trop souvent négligée, il a souvent été démontré qu'il améliorerait la résistance des plantes à certains stress biotiques (maladies cryptogamiques) et abiotiques (comme des excès de Na⁺ pour les sols salés ou en Mn²⁺ pour les sols acides). C'est d'ailleurs un minéral utilisé assez spécifiquement en biodynamie (Koepf *et al.*, 2001).

Le cas du sodium est différent. Rappelons d'abord que cet élément est toxique à forte dose. Il permet néanmoins de compenser un manque partiel de potassium, en se substituant aux fonctions osmotiques de ce dernier, par exemple au niveau des vacuoles des cellules. En d'autres termes, c'est son caractère d'osmoticum qui joue un rôle, au même titre que le K⁺ et les sucres solubles qui participent à créer un appel d'eau dans les cellules, provoquant leur croissance, leur rigidité, et le fonctionnement des stomates pour les cellules de garde. Le Na

ne remplacera pas le K dans le cytoplasme des cellules où ce dernier exerce des fonctions qui lui sont propres (figure 3.2). Le Na⁺ joue ainsi un rôle de supplétif partiel de K⁺ (Wakeel et al., 2011). Cette propriété explique sûrement que des cultures considérées comme exigeantes en K bénéficient d'apports de Na, comme c'est le cas avec la betterave.

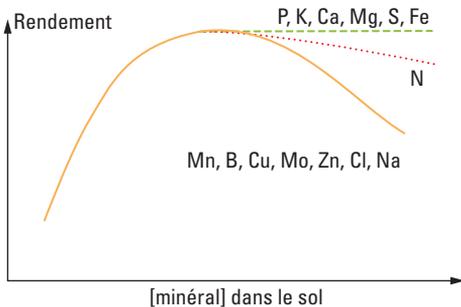


▲ **Figure 3.2:** Représentation schématique d'une cellule de moins en moins alimentée en K en allant vers la droite. Une compartimentation du K entre vacuole et cytoplasme permet à la cellule de conserver le K dans le compartiment où celui-ci joue un rôle qui lui est spécifique (150 mM), alors que sa carence se fait au détriment de sa concentration dans la vacuole où son rôle d'osmoticum peut être assuré par le sodium. En deçà d'un certain seuil, la cellule ne peut plus empêcher la perte de K du compartiment cytoplasmique, et les rendements diminuent. À cela peut aussi s'ajouter un risque de toxicité en Na.

Source: Leigh et Wyn Jones, 1984

E. Éléments : plus il y en a, mieux c'est ?

Le fait d'être un minéral indispensable (tableau 3.1) ne signifie pas pour autant que le rendement de la culture est proportionnel au prélèvement effectué. La réponse classique d'une culture à une concentration croissante d'un minéral (entraînant un prélèvement accru de cet élément) montre une partie où le rendement est (de moins en moins) corrélé à la concentration, puis une absence réponse suivie ou pas d'une baisse de rendement (figure 3.3, loi des rendements moins que proportionnels, Mitscherlich, 1909).



Il faut préciser cependant que si une plante peut ne pas réagir négativement à un excès de minéral, du point de vue du rendement, celui-ci peut en revanche créer une carence induite d'un autre minéral (chapitre 5.II), altérer la qualité du produit récolté (l'excès de protéine de l'orge diminue ses qualités brassicoles), altérer les propriétés du sol (Na), provoquer des fuites vers les eaux et l'atmosphère (N), favoriser le développement de maladies diminuant la production.

▲ **Figure 3.3:** Réponses-typiques de la production de matière sèche d'une plante à une augmentation des concentrations en éléments dans le sol. L'excès d'azote peut pénaliser les rendements, du fait des phénomènes de verse des tiges pour les céréales. Dans le cas des oligoéléments, on a plus affaire à des phénomènes de vraies toxicités.

F. Qu'est-ce qu'un élément limitant ?

Il apparaît très clairement que, outre les cas des calcosols et sodisols où les concentrations en Ca et Na sont importantes, les concentrations de certains minéraux dans les plantes sont dix fois plus élevées que dans les sols (éléments totaux) pour les plus limitants d'entre eux (éléments majeurs, colonne 6 du tableau 3.1). Le rapport des concentrations permet d'ailleurs de définir la notion de « facteur limitant ». Contre toute intuition, les micronutriments représentent rarement des minéraux limitants, comme en témoigne leur classement dans la dernière colonne du tableau 3.1. En revanche, pour les éléments majeurs, les rapports élevés entre offre et demande laissent supposer des situations où l'alimentation pourrait se révéler insuffisante. Ce classement ne tient cependant pas compte de la phyto-disponibilité⁸ des minéraux du sol. Le choix d'utiliser les éléments totaux ne permet pas de se faire une idée exacte de l'ordre des facteurs vraiment limitants, mais les teneurs totales sont au moins incontestables en matière analytique et d'interprétation (Baize, 2000).

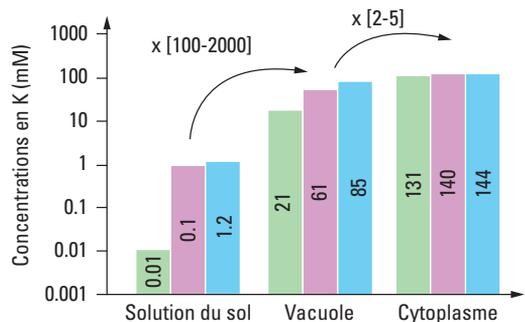
G. Pourquoi est-il si difficile de connaître les concentrations de minéraux dans les plantes ?

Les différences de concentrations entre minéraux dans les plantes tiennent au rôle qu'ils jouent en **physiologie végétale**, ainsi qu'à leur abondance dans le milieu : il y a par exemple 1 million de fois plus d'atomes d'azote dans une plante que d'atomes de molybdène (tableau 3.1).

Mais, pour un minéral donné, les concentrations dans les plantes et entre organes sont susceptibles de varier de plusieurs ordres de grandeur (1 à 20). Intuitivement, on pourrait incriminer en premier lieu le **niveau d'offre du sol** en minéraux, dont les concentrations (ions en solution) présentent des valeurs pouvant varier au cours d'un cycle cultural... de 1 à 1 000 ! Pour autant, face à de telles différences, les concentrations dans les plantes ne varient « que » dans une fourchette maximale de 1 à 20 (figure 3.5), grâce à l'existence de réservoirs « tampon », les vacuoles (figure 3.4; Mengel et Kirkby, 2001), qui occupent 90 % du volume des cellules et ont par conséquent une forte influence sur la concentration à l'échelle de la plante.

Pour un niveau d'offre du sol donné, les concentrations varient également selon l'**espèce végétale**, certaines plantes ayant des besoins spécifiques, par exemple liées au type de graines produites. La brochure éditée par le Comifer (2007) décrivant les teneurs en P, K et Mg des organes des végétaux récoltables rappelle ainsi que la teneur en P d'une graine de tournesol est deux fois plus élevée que celle d'une graine de maïs. Par ailleurs, les plantes légumineuses ont en moyenne des teneurs en minéraux plus importantes que les graminées. L'influence de l'espèce végétale sur les concentrations en minéraux est du même ordre de grandeur que celle de l'offre du sol (figure 3.5).

Le **stade végétal** auquel est mesuré le minéral importe également, étant donné que les dynamiques de prélèvements des éléments varient dans le temps (figure 3.10) et que les



▲ **Figure 3.4:** Effet de l'augmentation du potassium (K) dans la solution du sol sur les concentrations vacuolaires et cytoplasmiques. Le K dans les vacuoles peut varier sans effet notable sur la physiologie de la plante; en revanche, la concentration dans le cytoplasme peut vite devenir critique. L'ajustement se fait donc toujours au détriment du compartiment tampon vacuolaire. L'échelle est logarithmique. Les différentes couleurs se renvoient à des niveaux d'alimentation en K différents.

Source : d'après Mengel et Kirkby, 2001

8. Disponibilités des minéraux du sol pour les plantes. Le terme de biodisponibilités, plus général, utilisé ailleurs dans l'ouvrage est équivalent.

Comment mettre en place une stratégie efficace de fertilisation raisonnée, appliquée aux grandes cultures et aux prairies ?

Après avoir rappelé les fondements de l'agronomie applicables à toutes les filières de production, l'ouvrage présente :

- les cycles fondamentaux des éléments qui contribuent à la nutrition des végétaux,
- le calcul de la fertilisation, en fonction de l'offre du sol, des objectifs de production et des interactions entre sol et plantes,
- les moyens dont dispose l'agriculteur pour déterminer les apports en fertilisants nécessaires ainsi que les modalités de leur application,
- les aspects de la fertilisation dans différents contextes : environnement, territoires, extensification, économie, qualité, réglementation,
- plus de 50 experts répondent à l'ensemble des questions sur la fertilisation aujourd'hui et demain. Leur propos est richement illustré par 300 figures et autant de photos, pour rendre le plus accessible possible les données essentielles à une mise en pratique au champ.

Le COMIFER, Comité Français d'Étude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée est une association, créée en 1980, régie par la loi du 1^{er} juillet 1901. Le COMIFER organise une concertation permanente entre les acteurs de la fertilisation raisonnée afin d'élaborer et promouvoir les références et les méthodes collectivement validées, encourager les solutions innovantes qui concourent à une agriculture durable, performante et respectueuse de l'environnement. Pour en savoir plus : www.comifer.asso.fr