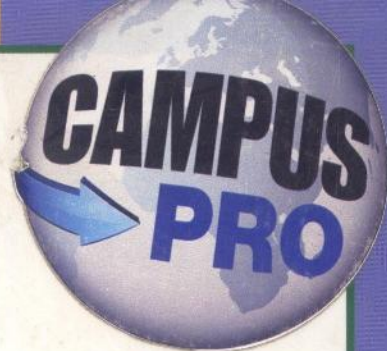
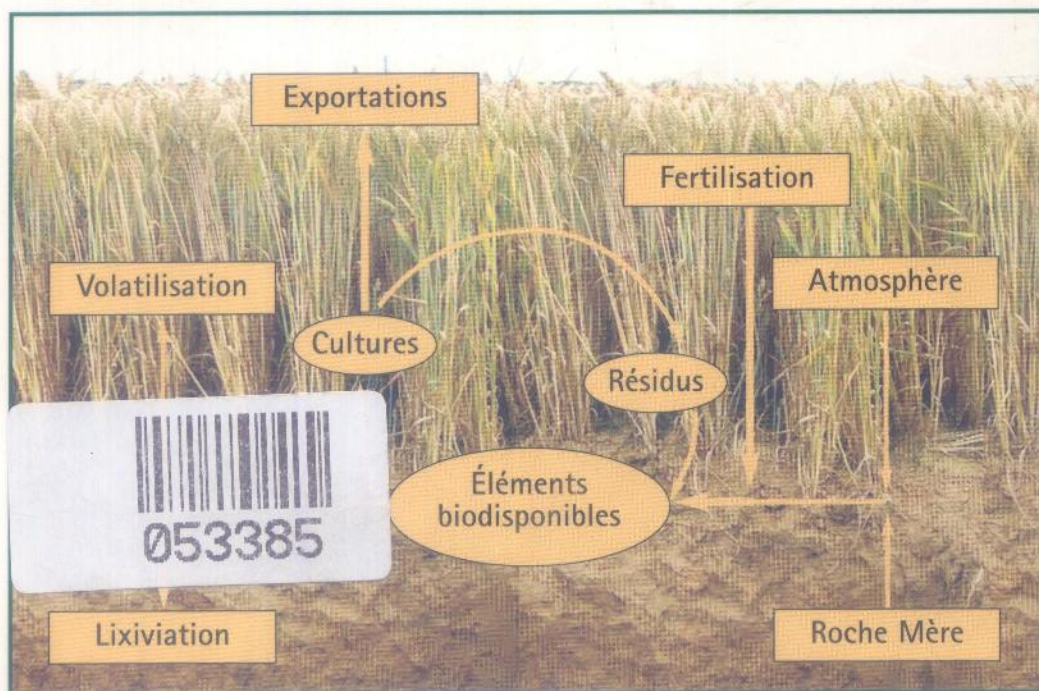


Produire mieux



**Guide
de la**

fertilisation raisonnée



Christian Schvartz, Jean-Charles Muller, Jacques Decroux
sous l'égide du COMIFER

Editions
France Agricole

053385

AGR 204

③



Guide de la fertilisation raisonnée

Grandes cultures et prairies



053385

Christian Schvartz, Jean-Charles Muller, Jacques Decroux
sous l'égide du COMIFER

Sommaire

Préface	3
Sommaire	5
Introduction	17
1. Agriculture et fertilisation	19
1-1 Quelques termes utilisés en agriculture	21
1-1.1 Écologie	21
1-1.2 Pédologie	22
1-1.3 Agronomie	24
1-1.4 Agriculture	26
1-1.5 Système de culture	27
1-1.6 Fertilisation	29
1-2 L'exploitation agricole	31
1-2.1 Définition actuelle de l'exploitation et son évolution	32
1-2.2 L'exploitation agricole : un système ouvert sous contrainte	36
1-2.3 Principaux systèmes de production : définition des termes et évolution des concepts	37
A - Agriculture intensive ou agriculture productiviste	38
B - Agriculture biologique	39
a/ l'agriculture biodynamique	40
b/ l'agriculture organique	40
c/ l'agriculture biologique	41
C - Agriculture raisonnée	42
D - Agriculture intégrée	43
E - Agriculture écologique	44
1-3 De la parcelle au bassin versant, un même souci : le maintien de la fertilité	47
1-3.1 Fertilité ou aptitude culturale	47
1-3.2 Les unités structurant l'espace	49
A - L'espace rural ou « campagne »	49
B - Notion de terroir	52
C - Le bassin versant : une nouvelle unité à prendre en compte	53
D - Le bassin d'approvisionnement	54
1-3.3 Les unités structurant l'exploitation	54
1-4 Notion de fertilisation raisonnée	56

2. Le sol	59
2-1 Définition	60
2-2 Composition	61
2-3 Analyse granulométrique et texture	63
2-4 Physico-chimie : pH et capacité d'échange cationique	66
2-4.1 La notion de pH et son application en agronomie	66
2-4.2 La capacité d'échange cationique ; charge variable et taux de saturation	68
2-4.3 Les sources d'acidification du sol	69
2-5 Structure du sol : rétention et circulation de l'eau et de l'air	71
2-6 Organismes vivants	76
3. Les cycles biogéochimiques des éléments fertilisants	81
3-1 Notion de cycle biogéochimique	83
3-2 Carbone et matières organiques	85
3-2.1 Le carbone dans la biosphère	85
3-2.2 Le carbone et les matières organiques dans le sol	86
3-2.3 Modèles de prévision de l'évolution de la matière organique des sols	93
3-2.4 Evolution des réserves organiques des sols	98
3-3 Cycle biogéochimique de l'azote	102
3-3.1 L'azote dans la biosphère	102
3-3.2 L'azote et la vie	102
3-3.3 L'azote dans le sol	102
A - Les transformations	105
a/ fixation d'azote atmosphérique	105
b/ minéralisation de l'azote organique	106
c/ organisation de l'azote minéral	106
B - Les pertes	108
a/ dénitrification	108
b/ volatilisation d'ammoniac	110
c/ pertes d'azote vers les aquifères	110
3-3.4 En résumé : quelques faits essentiels	112
3-4 Cycle biogéochimique du soufre	116
3-4.1 Le soufre dans la biosphère	116
3-4.2 Le soufre dans le sol	116
A - Cycle biogéochimique du soufre	118
B - Minéralisation et organisation du soufre dans le sol	119
3-4.3 Conséquences agronomiques	121
A - Pertes par lixiviation et risques de carence	121
B - Bilan diagnostique du soufre et comparaison avec celui de l'azote	122

3-5 - Cycle biogéochimique du phosphore	124
3-5.1 Le phosphore dans la lithosphère	125
3-5.2 Le phosphore dans le sol	125
A - Formes du phosphore dans le sol	125
a/ composés minéraux du phosphore	126
b/ composés organiques du phosphore	126
B - Cycle biogéochimique du phosphore	127
C - Biodisponibilité du phosphore	128
3-5.3 Conséquences agronomiques	130
A - Coefficient Réel d'Utilisation : CRU	130
B - Modification de l'offre alimentaire phosphatée du sol sous l'effet d'exportations de phosphore par les récoltes ou d'apports d'engrais	132
3-5.4 Phosphore et eutrophisation des écosystèmes	134
3-6 Cycle biogéochimique du potassium	136
3-6.1 Le potassium dans la lithosphère	136
3-6.2 Le potassium dans le sol	136
A - Formes du potassium dans le sol	136
B - Cycle biogéochimique et biodisponibilité du potassium	137
3-6.3 Conséquences agronomiques	138
A - Estimation de la biodisponibilité	138
a/ potassium échangeable	138
b/ potassium intermédiaire	139
c/ potassium isotopiquement échangeable	139
B - Bilan cultural « F - E », teneur du sol et réserves biodisponibles en potassium	141
3-6.4 Potassium et pollution	142
3-7 Cycle biogéochimique du calcium	142
3-7.1 Le calcium dans la lithosphère	143
3-7.2 Le calcium dans le sol	143
A - Cycle biogéochimique du calcium	143
a/ composés minéraux solides	144
b/ formes adsorbées	144
c/ formes solubles	144
B - Matière organique et calcium	145
3-7.3 Intérêts agronomiques du calcium	145
3-7.4 Origine de l'acidification des sols et décalcification	146
3-7.5 Pertes en calcium	146
3-8 Cycle biogéochimique du magnésium	148
3-8.1 Le magnésium dans la lithosphère	148
3-8.2 Le magnésium dans le sol	148
A - Cycle biogéochimique du magnésium	148
B - Biodisponibilité du magnésium	149
3-8.3 Conséquences agronomiques	150
A - Estimation de la biodisponibilité	150
B - Transfert du magnésium dans le sol	150

3-9 Cycle biogéochimique des éléments en traces et oligo-éléments	152
3-9.1 Eléments en traces et oligo-éléments dans la lithosphère	153
3-9.2 Eléments en traces et oligo-éléments dans le sol	153
3-9.3 Cycle biogéochimique des oligo-éléments	154
A - Sources et pertes	154
B - Biodisponibilité	156
3-9.4 Intérêt agronomique des oligo-éléments	159
3-9.5 Eléments minéraux en traces et pollution des sols	160
4 - Le peuplement végétal cultivé	167
4.1 Besoins du peuplement végétal cultivé en éléments fertilisants	168
4-1.1 Rôles biophysiques et biochimiques des principaux éléments fertilisants	168
4-1.2 Teneurs des plantes en éléments minéraux	169
A - Teneur analytique en éléments nutritifs	170
B - Teneur critique en élément nutritif	170
C - Indice de nutrition	171
D - Prélèvement critique	173
4-1.3 Prélèvements par le peuplement végétal	173
A - Modélisation du fonctionnement d'une culture, production de biomasse	174
B - Courbes d'absorption	175
C - Prélèvement d'éléments nutritifs par une culture	177
4.2 Potentialités agricoles	187
4-2.1 Notion de potentialité de production d'une espèce végétale	187
4-2.2 Prise en compte de la variabilité climatique	190
4-2.3 Prise en compte de la variabilité due aux sols	193
A - Cartographie	193
B - Typologie des sols	194
4-2.4 Productivité ou rendement	196
A - Position du problème	196
B - Deux exemples	197
a/ détermination des potentialités du blé en Saône et Loire	197
b/ détermination de l'objectif de rendement dans le réseau OPAL	198
4.3 Exemples de calcul des besoins en azote des cultures	199
4-3.1 Cultures annuelles	199
4-3.2 Cultures fourragères	200
5 - Les outils d'aide à la décision	203
5-1 Analyse de terre	204
5-1.1 Prélèvement de l'échantillon	206

5-1.2 Analyses de terre au laboratoire	209
A - Quelles analyses de terre réaliser pour raisonner la fertilisation	209
a/ diagnostic de la biodisponibilité	209
b/ analyses physiques	210
c/ analyses chimiques	210
d/ analyses biologiques	213
B - Utilisation des analyses de terre	215
5-2 Analyse de la plante	216
5-2.1 Prélèvement pour analyse	216
A - Echantillonnage en vue d'un diagnostic nutritionnel	217
a/ cas des cultures annuelles	217
b/ cas des systèmes prairiaux	218
B - Echantillonnage en vue d'identifier l'origine de symptômes observés	220
C - Echantillonnage en vue de bilans minéraux	220
5-2.2 Analyses de plante au laboratoire	220
5-2.3 Analyse de plante sur le terrain	221
5-3 Pratique analytique du contrôle de la fertilisation	223
5-3.1 Grandes cultures	224
5-3.2 Prairies	224
A - Indices de Nutrition Phosphatée et Potassique (INP, INK)	224
B - Indice de Nutrition Azotée (INN)	225
C - Utilisation des indices	225
6 - Calcul de la fertilisation en complément de l'offre du sol	227
6-1 Calcul des apports d'azote	228
6-1-1 Principes généraux	228
A - Équation du bilan de masse prévisionnel	228
B - Équation du bilan avec CAU	229
6-1-2 Grandes cultures	230
A - Calcul selon l'équation du bilan prévisionnel	230
a/ détermination du reliquat d'azote minéral à l'ouverture du bilan (Re)	231
b/ évaluation de la minéralisation nette des matières organiques du sol (Mo)	232
B - Calcul selon l'équation d'efficacité de l'azote, avec utilisation du CAU (Coefficient Apparent d'Utilisation)	238
a/ détermination de l'azote absorbé sans apport d'engrais (No)	239
b/ évaluation du CAU	241
6-1.3 Les systèmes prairiaux	243
A - Évaluation de la fourniture du sol, $No = N_{pf} + N_{rest} + N_{leg}$	245
a/ calcul de l'azote absorbé une prairie, fauchée et sans légumineuses (N_{pf})	245
b/ calcul de la contribution directe des déjections animales du pâturage de l'année à l'alimentation azotée de la prairie (N_{rest})	246
c/ estimation de la contribution des légumineuses (N_{leg})	246
B - Efficacité des apports	247
a/ effet direct des engrais de ferme (N_{ef}), équivalence-azote d'un engrais minéral	247
b/ Coefficient Apparent d'Utilisation de l'azote - CAU	247

6-2 Calcul des apports de soufre	250	6-4 Calcul des apports de calcium et de magnésium	273
6-2.1 Cultures annuelles		6-4.1 Cultures annuelles	273
A - Critères à prendre en compte pour déterminer la stratégie de fertilisation soufrée	251	A - Critères à prendre en compte pour déterminer la stratégie d'apport des cations Ca^{2+} et Mg^{2+}	273
a/ lixiviation du soufre-sulfate - risque de déficience	251	a/ caractérisation de l'offre du sol	274
b/ besoins en soufre des cultures	251	b/ besoins des cultures en calcium et magnésium	275
c/ sources de soufre provenant des apports à la parcelle	252	B - Stratégie de fertilisation	276
c 1 - engrais minéraux	252	a/ calcium	276
c 2 - amendements organiques	252	b/ magnésium	276
c 3 - retombées atmosphériques	252	6-4.2 Les systèmes prairiaux	277
B - Stratégie de fertilisation	253	A - Critères à prendre en compte pour définir la stratégie d'apport de magnésium	279
a/ grille d'évaluation du risque d'une déficience en soufre	253	a/ pH_{eau} du sol	279
b/ date des apports et doses	256	b/ teneur du sol en magnésium échangeable	279
		c/ besoins des plantes fourragères	279
6-2.2 Les systèmes prairiaux	257	B - Stratégie de fertilisation	280
A - Critères à prendre en compte pour déterminer la stratégie de fertilisation soufrée sur prairie	257		
a/ lixiviation du soufre sulfate du sol - risque de déficience	257	6-5 - Calcul des apports d'oligo-éléments	280
b/ besoins en soufre des plantes fourragères	258	6-5.1 Cultures annuelles	280
c/ indice de nutrition soufrée : iNS	258	A - Critères à prendre en compte pour déterminer la stratégie d'apport des oligo-éléments (Fe - Mn - Zn - Cu - B - Mo)	280
d/ le passé récent de fertilisation soufrée de la parcelle	259	a/ quantité d'oligo-élément disponible dans un sol	281
e/ grille d'évaluation du risque d'une déficience en soufre	259	b/ nature des sols	281
B - Stratégie de fertilisation	259	c/ conditions climatiques et les facteurs agronomiques	282
a/ évaluation de la biodisponibilité du soufre d'une parcelle	259	d/ espèces cultivées	284
b/ date des apports et doses SO_3	259	B - Estimation de la nécessité d'un apport	284
		a/ à partir des besoins de la culture	284
		b/ à partir de l'analyse de terre	285
6-3 Calcul des apports de phosphore et de potassium	260	6-5.2 Les systèmes prairiaux	287
6-3.1 Cultures annuelles	261	A - Critères à prendre en compte pour déterminer la stratégie d'apport des oligo-éléments	288
A - Critères à prendre en compte pour déterminer la stratégie de fertilisation P et K	261	a/ quantité d'oligo-éléments disponible dans le sol	288
a/ comportement des cultures et fertilisation P_2O_5 ou K_2O	261	b/ amendements et les fumures pratiqués	288
b/ l'analyse de terre et son interprétation	261	c/ espèce végétale et son exploitation comme fourrage	290
b 1 - analyse du phosphore	261	B - Calcul de la quantité à apporter	290
b 2 - analyse du potassium	262		
b 3 - utilisation des résultats	263	6-6 - Calcul des apports d'amendements basiques	291
c/ passé récent de fertilisation	265	6-6.1 Cultures annuelles et pluriannuelles	292
c 1 - pouvoir fixateur	266	A - Critères à prendre en compte pour déterminer la stratégie d'apport des amendements basiques	292
c 2 - bilan cultural pondéré (F - E)	266	a/ pH du sol	292
c 3 - résidus de culture du précédent	267	b/ Capacité d'Échange Cationique : CEC	292
c 4 - caractérisation du passé récent de fertilisation	267	c/ taux de saturation de la CEC_E (V)	293
B - Stratégie de la fertilisation PK	267	B - Détermination du besoin en bases du sol (BEB)	294
C - Bases de prescription du conseil de fumure	269	a/ besoin en bases des sols acides à $\text{pH}_{\text{eau}} \geq 5,8$	294
		b/ besoin en base des sols très acides ($\text{pH}_{\text{eau}} < 5,8$)	295
6-3.2 Les systèmes prairiaux	270	C - Stratégie d'apport des amendements basiques - pH souhaitable	296
A - Notion d'indice de nutrition en phosphore et potassium	270	a/ objectif général	296
		b/ besoins en bases du sol (BEB)	296

6-6.2 Les systèmes prairiaux permanents (ou de longue durée)	298
A - Critères à prendre en compte pour déterminer la stratégie d'apport des amendements basiques	299
a/ caractérisation du statut acido-basique du sol	299
b/ détermination des types de prairies permanentes	299
B - Détermination du Besoin En Bases du sol (BEB)	300
C - Stratégie d'apport des amendements basiques - pH souhaitable	300

7 - Mise en œuvre de la fertilisation 307

7-1 Origine et critères d'appréciation des matières fertilisantes	308
7-1-1. Les engrais minéraux simples	308
A - Engrais azotés	308
a/ engrais nitriques	309
b/ engrais ammoniac-nitriques	310
c/ engrais ammoniacaux	310
d/ autres formes	310
B - Engrais phosphatés	311
a/ superphosphates	312
b/ phosphates naturels partiellement solubilisés	313
c/ phosphates naturels partiellement tendres (fins ou semi-fins)	313
d/ Scories Thomas	313
C - Engrais potassiques	313
a/ chlorure de potassium, KCl	314
b/ sulfate de potassium, K_2SO_4	314
c/ Patent-Kali, K_2SO_4 , $MgSO_4$	314
7-1.2 Les engrais minéraux composés	314
A - Engrais composés obtenus par réactions chimiques	315
B - Engrais composés obtenus par mélange physique, après mouture d'engrais simples	315
C - Engrais composés obtenus par mélange mécanique d'engrais simples ou complexes	315
D - Engrais composés liquides obtenus par dissolution dans l'eau	315
E - Désignation des engrais composés minéraux	316
7-1.3 Les fertilisants organiques	317
A - Engrais organiques disponibles sur le marché	317
B - Fertilisants organiques d'origine agricole : les engrais de ferme	318
a/ azote des engrais de ferme	321
b/ phosphore et potassium des engrais de ferme	323
c/ autres éléments présents dans les engrais de ferme	324
C - Fertilisants organiques d'origine non agricole : boues, eaux résiduaires, composts urbains	325
a/ typologie des produits organiques d'origine non agricole	326
b/ valorisation agronomique des fertilisants organiques d'origine non agricole	326
D - Effet amendant des produits organiques	332

7-1.4 Les amendements minéraux basiques	333
A - Types d'amendements minéraux basiques	333
B - Critères d'appréciation des amendements minéraux basiques	334
a/ valeur neutralisante	335
b/ solubilité carbonique	335
c/ finesse de mouture	335

7-2 Efficacité des engrais 336

7-2.1 La solubilité eau des engrais	336
7-2.2 L'état physique de l'engrais	338
A - Forme gazeuse	339
B - Forme liquide	339
C - Forme solide	339

7-2.3 Le mode d'incorporation au sol	340
A - Engrais dispersé	340
a/ épandage en plein avant le labour	340
b/ épandage en plein après le labour	340
c/ épandage en couverture	340
B - Engrais localisé	341
a/ fumure starter	341
b/ localisation en profondeur	341

7-2.4 Le stade de développement de la culture au moment de l'apport	341
A - Grandes cultures	342
a/ azote	342
b/ phosphore et potassium	345
B - Prairies permanentes et temporaires	347
a/ azote	347
b/ phosphore et potassium	348
c/ emploi des engrais de ferme sur prairies	349

7-3 Techniques d'épandage 350

7-3.1 Les engrais minéraux solides	350
A - Caractéristiques physiques des engrais solides	350
a/ masse volumique apparente	352
b/ distribution granulométrique	352
c/ sphéricité	354
d/ taux d'écoulement	354
e/ dureté	354
f/ friabilité	354
g/ taux de poussière	354
h/ résistance à la reprise d'humidité	355
i/ résistance à la prise en masse	355
j/ influence des caractéristiques physiques sur la précision d'épandage des engrais solides	355
B - Modes d'épandage des engrais solides	356
a/ épandage en plein	356
b/ épandage en localisation	356

C - Régularité de l'épandage	356
D - Utilisation des équipements de fertilisation	358
7-3.2 Les engrais liquides	358
7-3.3 Les engrais de ferme	359
A - Fumier	359
a/ évaluation de la quantité	359
b/ maîtrise de la dose de fumier épandue	361
B - Lisier	362
a/ homogénéisation	362
b/ maîtrise de la dose de lisier épandue	363
7-4 Fertilisation et économie : part des fertilisants dans la production agricole	365
7-4.1 Les étapes récentes de la fertilisation en France	365
A - 1 ^{re} étape - Établissement des lois de la fertilisation (1950-1973)	366
B - 2 ^e étape - Approche économique de la fertilisation (1974-1990)	366
C - 3 ^e étape - mise en place de la fertilisation raisonnée (1991- ...)	366
7-4.2 L'évolution des apports de fertilisants minéraux	367
7-4.3 La place des fertilisants dans les consommations intermédiaires	368
7-4.4 L'évolution des coûts de production	369
7-4.5 L'évolution du prix des fertilisants	370
7-4.6 Fertilisation et production de biens alimentaires	371
7-4.7 Vers une fertilisation mieux raisonnée	372
8 - Fertilisation et environnement	373
8-1 L'exploitation agricole : un système à gérer sous contrainte. bref rappel historique	374
8-2 Impacts de la fertilisation sur l'environnement : la réalité des faits	375
8-2.1 Impacts sur le sol	376
A - Le sol, maillon clé du cycle biogéochimique des éléments	376
B - Évolution des techniques de fertilisation	376
C - Diminution de la teneur en matière organique des sols	377
8-2.2 Impacts sur l'eau	377
A - Engrais azotés et nitrate	377
a/ le cas du nitrate	378
b/ la norme de 50 milligrammes de nitrate par litre	378
c/ les sources de nitrate	378
d/ les pertes en azote	380
B - Engrais phosphatés	381
C - Engrais potassiques	381
D - Fertilisation et pollution	381

8-2.3 Impacts sur l'air	382
A - Émission de polluants vers l'atmosphère	382
B - Réduction de la teneur en gaz carbonique	383
8-3 Fertiliser dans un contexte de gestion raisonnée des risques	383
8-3.1 Le contexte actuel	383
8-3.2 Raisonner la fertilisation dans le nouveau contexte	384
A - Choix du niveau global des intrants	384
B - Désintensification raisonnée	385
8-3.3 Des besoins d'information sur les sols	385
A - Analyse de terre et le conseil de fertilisation	385
B - Outils d'aide à la décision	387
8-4 Fertilisation et qualité des productions agricoles	388
8-4.1 Définitions de la qualité des productions agricoles	388
A - Critères subjectifs	388
B - Critères objectifs	389
8-4.2 Influence des éléments fertilisants sur la qualité des produits	389
8-4.3 Risques de contamination des récoltes par les micro polluants minéraux, organiques et les produits phytosanitaires	391
8-4.4 Quelques exemples de relation entre la fertilisation et la qualité de la production végétale	391
A - Betterave sucrière	391
B - Blé tendre panifiable	392
C - Orge de printemps brassicole	394
D - Pomme de terre de consommation	394
E - Fourrages	395
8-4.5 Démarches qualité en grandes cultures	396
8-5 Des actions pour avancer...	397
8-5.1 Aspects réglementaires	397
A - La directive « nitrates »	397
B - Les zones sensibles	398
C - Le code des Bonnes Pratiques Agricoles	398
8-5.2 Des démarches volontaires de la profession	401
A - Opérations Ferti-Mieux	401
B - Association FARRE	403
C - Contrats territoriaux d'exploitation (CTE) et Contrats d'Agriculture Durable (CAD)	404

Guide de la fertilisation raisonnée

L'ouvrage propose aux acteurs de la filière agricole les clefs de la mise en œuvre d'une fertilisation raisonnée, appliquée aux grandes cultures et aux prairies.

Après avoir rappelé, le caractère unique des lois de l'agronomie, applicables à toutes les formes de production agricole, les auteurs abordent :

- les cycles biologiques 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 les sols et les plantes,
- les moyens (notamment analytiques) dont l'agriculteur dispose 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.

La pratique de la fertilisation, longtemps dominée par les seules contraintes technico-économiques, a considérablement évolué au cours des 50 dernières années, valorisant le progrès des connaissances scientifiques, accompagnant les exigences des consommateurs et la prise en compte des contraintes environnementales.

A l'heure où l'agriculture raisonnée devient un concept familier du grand public, le COMIFER a souhaité qu'un point complet et précis soit réalisé sur les moyens disponibles pour le développement d'une fertilisation compatible avec une agriculture durable, respectueuse de l'environnement. Ce guide met à la disposition du monde agricole un recueil de références actualisé.

comifer



Editions
France Agricole