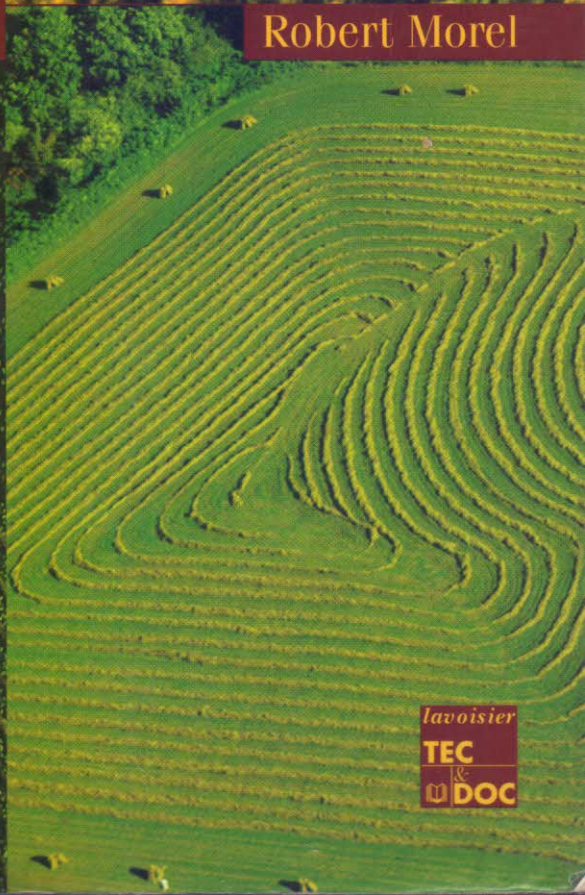


Les sols cultivés

2^e édition

Robert Morel



lavoisier
TEC
&
DOC

Table des matières

<i>Avant-propos</i>	III
<i>Aperçu historique sur la connaissance des sols et la nutrition minérale des végétaux</i>	XV
■ CHAPITRE 1 Généralités sur le sol	1
1. Description générale	1
2. Origine, formation et composition des sols	3
2.1 Désagrégation des roches	3
2.2 Actions de caractère biologique	6
2.3 Approches analytiques - Constituants fondamentaux du sol	8
3. Le sol, système énergétique complexe	11
4. Fonctionnement général du sol - Compartiments de sol	12
5. Constituants fondamentaux et environnement racinaire	14
5.1 Environnement physique	14
5.2 Environnement chimique et physico-chimique	15
6. Les hétérogénéités du sol	16
<i>Bibliographie</i>	20
■ CHAPITRE 2 Fractions minérales grossières	21
1. Rappel sur les constituants fondamentaux du sol	21
2. Caractéristiques granulométriques	21
3. Composition minéralogique	22
4. Évolution des fractions minérales grossières	24
4.1 Altération géochimique	24
4.2 Altération biochimique	25

5. Intérêt agronomique des fractions minérales grossières	26
5.1 Caractéristiques dimensionnelles	26
5.2 Caractéristiques évolutives	26
<i>Bibliographie</i>	27
■ CHAPITRE 3 Constituants argileux	29
1. Généralités	29
1.1 Définition - Constituants minéraux des argiles	29
• <i>Définition minéralogique</i> • <i>Définition granulométrique</i> • <i>Principaux constituants des argiles des sols</i>	
1.2 Méthodes d'étude	31
• <i>Méthodes physiques</i> • <i>Méthodes thermiques</i> • <i>Méthodes chimiques</i> • <i>Méthodes physico-chimiques</i> - <i>Capacité d'échange</i>	
2. Structure des phyllosilicates - Argiles des sols	34
2.1 Structure générale des argiles	34
• <i>Éléments structuraux des feuilletés</i> - <i>Coordinance</i> • <i>Dispositif tétraédrique</i> • <i>Dispositif octaédrique</i> • <i>Plans ioniques</i> - <i>Maille</i> - <i>Formule structurale</i>	
2.2 Substitutions isomorphiques hétérovalentes	41
2.3 Compensation des charges	41
• <i>Conséquences fondamentales</i> • <i>Structure de quelques minéraux argileux</i> - <i>Exemples de compensations de charges</i>	
2.4 Liaisons interfoliaires - Dispositions relatives des feuilletés	44
2.5 Argiles interstratifiées	46
2.6 Pseudophyllites ou argiles fibreuses	46
2.7 Classification des minéraux argileux	49
2.8 Argiles des sols	49
• <i>Minéralogie des argiles de sols</i> • <i>Associations de l'argile avec d'autres composés du sol</i> • <i>Notions sur la genèse des argiles</i>	
3. Propriétés des minéraux argileux	52
3.1 Caractères fonctionnels de la particule argileuse	52
• <i>Origines des propriétés des argiles</i> • <i>Forme, surface des particules</i> • <i>Charge des particules, couche diffuse</i>	
3.2 Adsorption et échange de cations	56
• <i>Description du phénomène</i> • <i>Caractéristiques du phénomène d'échange</i> • <i>Nature des ions fixés</i> - <i>Courbes de titration</i> - <i>Capacité d'échange</i> • <i>Expressions graphiques du phénomène d'échange</i> - <i>Relations quantitatives</i>	
3.3 Adsorption et échange d'anions	65
3.4 Floculation et dispersion des argiles	66
3.5 Système argile-eau	67
• <i>Absorption de l'eau par l'argile</i> • <i>Causes de l'absorption d'eau</i> - <i>Particularités de l'eau adsorbée</i> • <i>Comportements du système argile-eau</i>	
3.6 Les argiles dans les sols	70

4. Intérêt agronomique de l'argile	72
4.1 Activités liées à l'établissement de liaisons diverses	72
4.2 Activités liées à la charge électrique	72
5. Compléments - Aperçu sur les systèmes colloïdaux	73
5.1 Définitions	73
5.2 Quelques caractéristiques des systèmes colloïdaux	74
• Dimensions et surface des particules • Phénomène de diffusion • Stabilité des systèmes colloïdaux	
5.3 Floculation des colloïdes irréversibles	77
• Couche diffuse - Couche adhérente • Analyse du phénomène de floculation • Structure du floculat - Cas des particules argileuses	
Bibliographie	83

■ CHAPITRE 4 Fraction organique du sol

1. Aperçu général sur la matière organique des sols et son évolution	85
1.1 Origine de la matière organique du sol	85
1.2 Voies de la dégradation de la matière organique du sol	86
1.3 Différentes catégories de substances organiques du sol	88
1.4 Difficultés d'étude de la fraction organique non vivante du sol	89
2. Substances organiques non humiques	89
2.1 Glucides et substances apparentées	90
2.2 Composés azotés	92
2.3 Lipides et composés dérivés	92
2.4 Lignine et composés dérivés	92
2.5 Acides organiques	94
2.6 Enzymes	94
3. Substances humiques	95
3.1 Définitions	95
3.2 Extraction et méthodes d'étude	96
• Extraction • Méthodes d'étude • Étude des différentes fractions	
3.3 Constituants des substances humiques	99
• Composition élémentaire • Groupes fonctionnels caractérisés dans les substances humiques • Composés organiques décelés dans les substances humiques	
3.4 Structure des substances humiques	104
3.5 Propriétés des substances humiques	105
• Nature colloïdale - Acidité - Courbes de titration • Adsorption et échange d'éléments minéraux • Adsorption de composés organiques • Activité oxydo-réductrice • Floculation • Hydratation	
4. Les substances organiques dans le sol	111

5. Intérêt agronomique de la fraction organique du sol	111
5.1 Aspects comparatifs des fractions argileuse et organique	111
5.2 Influence sur l'environnement physique des racines	112
5.3 Influence sur l'environnement chimique et physico-chimique des racines	112
6. Complexes organiques et organo-minéraux	114
6.1 Complexes organo-minéraux	114
6.2 Types de liaison entre composés organiques et minéraux argileux	114
• <i>Liaisons de caractère électrostatique</i> • <i>Liaisons covalentes</i> • <i>Liaison hydrogène</i>	
• <i>Liaisons de LONDON - VAN DER WAALS</i> • <i>Liaison par insertion interfoliaire</i>	
6.3 Structure d'un complexe organo-minéral	116
<i>Bibliographie</i>	118

CHAPITRE 5 Environnement physique de la racine

1. Texture des sols	119
1.1 Analyse granulométrique	119
1.2 Représentations graphiques	121
1.3 Composition physique du sol - Représentation graphique	122
2. Structure des sols	123
2.1 Définition	123
2.2 Genèse de la structure du sol	125
• <i>Types de liaisons possibles</i> • <i>Interactions entre constituants du sol</i>	
2.3 Types de structure	128
2.4 Espace poral, porosités et densités des sols	129
2.5 Déterminations relatives à la structure des sols	129
2.6 Estimation de la stabilité structurale	132
• <i>Test de tamisage sous l'eau</i> • <i>Test de percolation</i>	
2.7 Évolution, dégradation de l'état structural du sol	134
• <i>Action de l'eau</i> • <i>Tassement, compacité</i>	
2.8 Amélioration et conservation de l'état structural du sol	138
2.9 Structure et agronomie	138
3. La phase liquide du sol	140
3.1 L'eau dans le sol	140
• <i>Rappels sommaires sur l'eau</i> • <i>États et comportements de l'eau dans le sol - Aspects descriptifs</i>	
3.2 États énergétiques de l'eau dans le sol	143
• <i>Potentiels de l'eau dans le sol</i> • <i>Phénomènes de capillarité</i> • <i>Le potentiel matriciel</i> • <i>Relations entre le potentiel matriciel et les teneurs en eau du sol</i>	
3.3 Teneurs en eau du sol - Déterminations - Valeurs caractéristiques	151

• Détermination pondérale • Détermination des teneurs en eau sur un sol en place par sonde à neutrons • Capacité de rétention (C.R.) - Capacité au champ - Évaluations - Variations • Points de flétrissement - Détermination - Variations • Eau disponible pour la plante	
3.4 Circulation de l'eau dans les sols	156
• Circulation en sols saturés • Circulation en sols non saturés	
3.5 Humectation du sol par les pluies	161
• Infiltration de l'eau dans un profil de sol • Redistribution de l'eau dans le profil • Dessèchement d'un sol nu par évaporation	
3.6 Alimentation en eau du végétal	165
• Réserve hydrique • Système sol-plante-atmosphère • Accès de l'eau du sol à la racine	
3.7 Bilans hydriques des sols	169
• Éléments du bilan hydrique • Expression des bilans hydriques • Aspects méthodologiques	
3.8 Aspects agronomiques	172
• L'eau et le développement végétal • L'eau et l'activité microbienne du sol • Excès d'eau dans les sols	
4. L'état thermique du sol	176
4.1 Éléments du bilan thermique des sols	176
4.2 Propagation de la chaleur dans un solide	177
• Propagation dans un milieu homogène • Propagation de la chaleur dans le sol - Couverture du sol	
4.3 Régime thermique dans un profil de sol	180
• Oscillations thermiques • Profils thermiques	
4.4 Aspects agronomiques	182
• État thermique, végétation, population microbienne • État thermique et techniques culturales	
<i>Bibliographie</i>	184

■ CHAPITRE 6 Environnement chimique de la racine

1. Dynamique générale des transferts d'éléments dans le sol	187
1.1 Besoins végétaux et disponibilités du sol	187
1.2 Les transferts dans le sol	188
1.3 Phénomènes de solubilisation et d'insolubilisation	191
1.4 Phénomènes d'échange - Échange d'ions positifs	192
• Études expérimentales quantitatives des phénomènes d'échange • Définitions - Déterminations analytiques • Facteurs de variation de la capacité d'échange • Nature des ions fixés sur le complexe	
1.5 Échange d'anions	196

2. Transferts de protons dans le sol - Réaction des sols	198
2.1 L'ensemble protonique du sol - pH du sol	198
2.2 Détermination de la réaction des sols	200
2.3 Variations du pH des sols	201
2.4 Le pH des sols calcaires	203
2.5 Réaction des sols et agronomie	204
• Réaction du sol et comportement végétal • Réaction et propriétés des sols • Amélioration de la réaction des sols	
3. Transferts gazeux dans le sol - Transferts d'électrons	207
3.1 Phase gazeuse et respiration du sol	207
3.2 Transferts gazeux entre l'atmosphère et le sol	208
• Transferts par convection • Transferts par diffusion	
3.3 Transferts d'électrons dans les sols	210
3.4 Aperçus sur les phénomènes d'oxydo-réduction	211
• Systèmes redox, réactions d'oxydo-réduction • Potentiel d'oxydo-réduction • Détermination des valeurs E_h des sols - Résultats	
3.5 Différents processus oxydo-réducteurs rencontrés dans le sol	214
• Éléments chimiques concernés • Processus exclusivement chimiques • Processus biochimiques	
3.6 Intérêt agronomique des transferts gazeux et des transferts d'électrons dans le sol	216
4. Le potassium	218
4.1 Généralités - États dans le sol	218
4.2 Transferts de potassium dans le sol	220
• Solubilisation des minéraux primaires • Solubilisation des engrais • Pertes par lessivage • Minéralisation des substances organiques • Transferts du potassium dans le sol	
4.3 Approches sur la disponibilité du potassium dans le sol	222
• Alimentation des racines • Aspects méthodologiques	
4.4 Aspects agronomiques	225
• Fertilisation potassique • Protection racinaire du sol • Références analytiques	
5. Le phosphore	
5.1 Généralités - États dans le sol	226
• Composés minéraux du phosphore dans le sol • Composés organiques du phos- phore • Formes ioniques du phosphore • Formes adsorbées du phosphore	
5.2 Évolution du phosphore apporté au sol	229
• Phosphates solubles • Évolution des phosphates naturels • Évolution du phos- phore organique et activité biologique	
5.3 Dynamique du phosphore dans le sol	231
• Transferts généraux du phosphore dans le sol • Mobilité du phosphore dans le sol	

5.4 Alimentation phosphorée du végétal	236
• <i>Évaluation du phosphore du sol disponible pour la plante</i> • <i>Facteurs divers du transfert du phosphore du sol vers la racine</i>	
5.5 Aspects agronomiques	237
• <i>Choix des fertilisants phosphatés</i> • <i>Ampleur de la fertilisation phosphatée - Avance aux cultures</i> • <i>Prospection racinaire du sol - Localisation des engrais</i> • <i>Pertes dues à l'érosion du sol</i>	
6. Calcium - Magnésium	239
6.1 Le calcium	239
• <i>États du calcium dans le sol</i> • <i>Transferts de calcium dans le sol</i> • <i>Intérêt agronomique de l'ion calcium</i>	
6.2 Le magnésium	242
• <i>États du magnésium dans le sol - Transferts de magnésium dans le sol - Aspects agronomiques</i>	
7. Les oligo-éléments	244
7.1 Les oligo-éléments dans le végétal	244
7.2 Les oligo-éléments dans le sol	245
• <i>Teneur des sols en oligo-éléments - Mobilité</i> • <i>Facteurs de la disponibilité des oligo-éléments dans le sol</i>	
7.3 Diagnose des carences - Valeur seuils	249
7.4 Exemple de carence végétale : la chlorose ferrique	250
7.5 Aspects agronomiques	251
7.6 Phénomènes de toxicité - Pollution des sols	253
• <i>Actions toxiques d'oligo-éléments dans le sol</i> • <i>Pollution des sols</i>	
8. La solution du sol	255
8.1 Extraction	256
8.2 Composition	257
8.3 Variations quantitatives de composition	258
• <i>Variations d'origine physico-chimique</i> • <i>Variations d'origine biologique</i> • <i>Variations avec la fumure</i>	
8.4 Transfert des solutés dans le sol	259
• <i>Facteurs d'action</i> • <i>Alimentation racinaire</i>	
8.5 Eaux de drainage	262
• <i>Méthodes d'étude - Quantités drainées - Composition</i> • <i>Pertes d'éléments dues au drainage</i> • <i>Pollution nitrique des nappes aquifères - Aspects agronomiques</i>	
9. Complément du chapitre 6	270
9.1 Première loi de Fick	270
9.2 Deuxième loi de Fick	272
<i>Bibliographie</i>	273

■ CHAPITRE 7	Environnement biologique et biochimique de la racine	277
1. La biomasse des sols		277
1.1 Les organismes vivants du sol		277
	• <i>Organismes vivants autres que les racines</i> • <i>Racines</i>	
1.2 Facteurs de variation de l'activité microbienne du sol		287
	• <i>Facteurs physiques</i> • <i>Facteurs chimiques</i> • <i>Mobilité des micro-organismes dans le sol</i>	
1.3 Sociologie de l'ensemble vivant du sol		294
	• <i>Interactions entre les racines et la micro-population</i> • <i>Interactions affectant la micro-population</i> • <i>Équilibre biologique du sol</i>	
1.4 Intérêt agronomique de la biomasse		298
2. Les processus biochimiques fondamentaux dans les sols cultivés		299
2.1 Humification		301
	• <i>Différents aspects du phénomène</i> • <i>Analyse du phénomène</i> • <i>Lieux de formation des substances humiques</i>	
2.2 Minéralisation		306
	• <i>Causes de la minéralisation</i> • <i>Processus de la minéralisation</i> • <i>Facteurs de la minéralisation</i>	
2.3 Nitrification		315
	• <i>Espèces bactériennes nitrifiantes</i> • <i>Facteurs de la nitrification dans le sol</i> • <i>Inhibiteurs de nitrification</i> • <i>Nitrification et ammonification</i> • <i>Biochimie de la nitrification</i>	
2.4 Dénitrification		318
	• <i>Facteurs de la dénitrification</i> • <i>Biochimie de la dénitrification</i> • <i>Dénitrification et agronomie</i>	
2.5 Fixation non symbiotique de l'azote moléculaire		321
	• <i>Micro-organismes fixateurs d'azote</i> • <i>Processus biochimique de la fixation</i> • <i>Facteurs de la fixation</i> • <i>Fixation non symbiotique de l'azote et agronomie</i>	
2.6 Fixation symbiotique de l'azote moléculaire		322
	• <i>Aspects généraux du phénomène</i> • <i>Biochimie de la fixation de l'azote</i> • <i>Le rhizobium dans le sol, inoculation</i> • <i>Quantités d'azote fixées par les légumineuses cultivées</i>	
3. Dynamique générale de la matière organique		326
3.1 Formation et évolution dans le système sol-plante-atmosphère		326
3.2 Transferts élémentaires		326
	• <i>Carbone</i> • <i>Azote</i> • <i>Soufre et phosphore</i>	
3.3 Étude quantitative		328
	• <i>Aperçu sur les techniques expérimentales</i> • <i>Bilan organique des sols cultivés - Turnover de la matière organique</i> • <i>Modèles d'étude</i> • <i>Taux de minéralisation de la matière organique</i>	

3.4 Teneur des sols en matière organique	334
• <i>Équilibre organique des sols</i> • <i>Facteurs de la teneur en matière organique des sols</i> - <i>Aspects agronomiques</i>	
3.5 L'azote minéral dans les sols	339
• <i>Variabilité dans l'espace et dans le temps</i> • <i>Dynamique de l'azote minéral dans le sol</i> - <i>Modèle compartimental</i> • <i>Bilan annuel des transferts d'azote minéral en sol cultivé</i> • <i>Aspects agronomiques du bilan de l'azote minéral</i> - <i>Fertilisation azotée</i> • <i>Azote minéralisable</i>	
4. Le soufre	345
4.1 Le soufre chez les végétaux et dans le sol	345
• <i>Le soufre chez les végétaux</i> • <i>Le soufre dans le sol</i>	
4.2 Transferts de soufre dans le sol - Dynamique du soufre	347
• <i>Apports au sol</i> • <i>Échanges avec le complexe absorbant</i> • <i>Drainage, insolubilisation</i> • <i>Dynamique du soufre organique</i> - <i>Homologie avec la dynamique de l'azote</i>	
4.3 Aspects agronomiques	350
<i>Bibliographie</i>	351
■ CHAPITRE 8 La fertilité des sols	355
1. Concepts sur la fertilité des sols	355
1.1 Aspects agronomiques de la notion de fertilité	355
• <i>Difficultés d'expression</i> • <i>Proposition d'une expression analytique de la fertilité</i>	
1.2 Fertilité propre du sol	357
• <i>Définition</i> - <i>Analyse fonctionnelle de la fertilité</i> • <i>Sources de facteurs de croissance</i> • <i>Transferts des facteurs de croissance</i> • <i>Caractère dualiste du fonctionnement du sol</i>	
2. Estimation de la qualité de fonctionnement d'un sol cultivé	362
2.1 Différents aspects du problème	362
2.2 Qualité de l'environnement chimique des racines - Fertilité chimique	363
• <i>Présentation synoptique</i> • <i>Analyse chimique des sols</i> • <i>Analyse des végétaux</i> • <i>Cultures en vases de végétation</i>	
2.3 Qualité de l'environnement physique des racines - Fertilité physique du sol	371
• <i>Présentation synoptique</i> • <i>Déterminations concernant la fertilité physique</i>	
2.4 Biologie et fonctionnement du sol	372
• <i>Action sur les facteurs de croissance</i> • <i>Action sur la qualité des transferts des facteurs de croissance</i> • <i>Action de la micro-population sur la racine elle-même</i>	
3. Fertilité des sols et agronomie	374
<i>Bibliographie</i>	375
<i>Ouvrages généraux</i>	377
<i>Index</i>	379