

# 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

<b>1. Description générale</b> .....	1
--------------------------------------	---

<b>2. Origine, formation et composition des sols</b> .....	3
--	---

2.1 Désagrégation des roches .....	3
------------------------------------	---

2.2 Actions de caractère biologique .....	6
---	---

2.3 Approches analytiques - Constituants fondamentaux du sol .....	8
--	---

<b>3. Le sol, système énergétique complexe</b> .....	11
--	----

<b>4. Fonctionnement général du sol - Compartiments de sol</b> .....	12
--	----

<b>5. Constituants fondamentaux et environnement racinaire</b> .....	14
--	----

5.1 Environnement physique .....	14
----------------------------------	----

5.2 Environnement chimique et physico-chimique .....	15
--	----

<b>6. Les hétérogénéités du sol</b> .....	16
---	----

<i>Bibliographie</i> .....	20
----------------------------	----

## ■ CHAPITRE 2 Fractions minérales grossières ..... 21

<b>1. Rappel sur les constituants fondamentaux du sol</b> .....	21
---	----

<b>2. Caractéristiques granulométriques</b> .....	21
---	----

<b>3. Composition minéralogique</b> .....	22
---	----

<b>4. Évolution des fractions minérales grossières</b> .....	24
--	----

4.1 Altération géochimique .....	24
----------------------------------	----

4.2 Altération biochimique .....	25
----------------------------------	----

<b>5. Intérêt agronomique des fractions minérales grossières</b> .....	26
5.1 Caractéristiques dimensionnelles .....	26
5.2 Caractéristiques évolutives .....	26
<i>Bibliographie</i> .....	27

## ■ CHAPITRE 3                    Constituants argileux .....

<b>1. Généralités</b> .....	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>	
<b>2. Structure des phyllosilicates - Argiles des sols</b> .....	34
2.1 Structure générale des argiles .....	34
• <i>Éléments structuraux des feuillet</i> s - <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 feuillets .....	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>	
<b>3. Propriétés des minéraux argileux</b> .....	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

<b>4. Intérêt agronomique de l'argile</b>	72
4.1 Activités liées à l'établissement de liaisons diverses	72
4.2 Activités liées à la charge électrique	72
<b>5. Compléments - Aperçu sur les systèmes colloïdaux</b>	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	
<i>Bibliographie</i>	83

## ■ CHAPITRE 4      Fraction organique du sol ..... 85

<b>1. Aperçu général sur la matière organique des sols et son évolution</b>	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
<b>2. Substances organiques non humiques</b>	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
<b>3. Substances humiques</b>	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	
<b>4. Les substances organiques dans le sol</b>	111

<b>5. Intérêt agronomique de la fraction organique du sol</b> .....	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
<b>6. Complexes organiques et organo-minéraux</b> .....	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** .....

<b>1. Texture des sols</b> .....	119
1.1 Analyse granulométrique .....	119
1.2 Représentations graphiques .....	121
1.3 Composition physique du sol - Représentation graphique .....	122
<b>2. Structure des sols</b> .....	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
<b>3. La phase liquide du sol</b> .....	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	
<b>4. L'état thermique du sol</b> .....	<b>176</b>
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 .....

<b>1. Dynamique générale des transferts d'éléments dans le sol</b> .....	<b>187</b>
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

<b>2. Transferts de protons dans le sol - Réaction des sols</b>	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	
<b>3. Transferts gazeux dans le sol - Transferts d'électrons</b>	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
<b>4. Le potassium</b>	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	
<b>5. Le phosphore</b>	
5.1 Généralités - États dans le sol	226
• Composés minéraux du phosphore dans le sol • Composés organiques du phosphore • 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 phosphore 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>	
<b>6. Calcium - Magnésium</b> .....	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>	
<b>7. Les oligo-éléments</b> .....	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>	
<b>8. La solution du sol</b> .....	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>	
<b>9. Complément du chapitre 6</b> .....	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

<b>1. La biomasse des sols</b> .....	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
<b>2. Les processus biochimiques fondamentaux dans les sols cultivés</b> .....	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>	
<b>3. Dynamique générale de la matière organique</b> .....	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 - 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 - Modèle compartimental</i> • <i>Bilan annuel des transferts d'azote minéral en sol cultivé</i> • <i>Aspects agronomiques du bilan de l'azote minéral - Fertilisation azotée</i> • <i>Azote minéralisable</i>	
<b>4. Le soufre</b> .....	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 - Homologie avec la dynamique de l'azote</i>	
4.3 Aspects agronomiques .....	350
<i>Bibliographie</i> .....	351

## ■ CHAPITRE 8                      La fertilité des sols .....

<b>1. Concepts sur la fertilité des sols</b> .....	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 - 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>	
<b>2. Estimation de la qualité de fonctionnement d'un sol cultivé</b> .....	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>	
<b>3. Fertilité des sols et agronomie</b> .....	374
<i>Bibliographie</i> .....	375
<i>Ouvrages généraux</i> .....	377
<i>Index</i> .....	379