

# Le SOL

- Constitution, propriétés physiques, physicochimiques et chimiques
- Organismes vivants : rôles, biodisponibilité de l'eau, des nutriments et des substances toxiques
- Qualité des sols, relations avec la qualité de l'air et des eaux

Raoul Calvet

2<sup>e</sup> édition



059310



ÉDITIONS  
France Agricole

AGR 258

059310



# Le sol

2<sup>e</sup> édition

Raoul Calvet



059310

# Sommaire



AVANT-PROPOS .....	XXI
INTRODUCTION .....	XXIII
DÉFINITIONS ET FONCTIONS DES SOLS :	
CONTEXTES ET ENJEUX DE LA SCIENCE DU SOL .....	XXIV
Résumé .....	XXIV
1. Un peu d'histoire .....	XXV
2. Qu'est-ce que le sol? .....	XXVII
2.1. Les diverses perceptions du sol .....	XXVII
2.2. La science du sol .....	XXXII
2.3. Les fonctions du sol .....	XXXIV
2.3.1. Fonctions écologiques .....	XXXIV
2.3.1.1. Fonction « milieu biologique » .....	XXXIV
2.3.1.2. Fonction environnementale .....	XXXIV
2.3.1.3. Fonction « puits et sources » dans les cycles biogéochimiques .....	XXXIV
2.3.1.4. Fonction de réservoir biologique .....	XXXV
2.3.2. Fonctions technologiques .....	XXXV
2.3.2.1. Fonction de support mécanique .....	XXXV
2.3.2.2. Fonction « source de matériaux » .....	XXXV
2.3.3. Fonctions socioéconomiques .....	XXXV
3. Les enjeux de la science du sol .....	XXXV
3.1. Les sols et l'agriculture .....	XXXVI
3.1.1. Contraintes physiographiques .....	XXXVII
3.1.2. Contraintes pédologiques .....	XXXVII
3.1.3. Ressources en sols .....	XXXIX
3.2. Le contexte environnemental .....	XLI
3.2.1. La place des sols dans l'environnement .....	XLI
3.2.2. Les pressions environnementales .....	XLI
3.2.2.1. Les fertilisants minéraux .....	XLI
3.2.2.2. Les pesticides .....	XLII
3.2.2.3. Éléments en traces et composés organiques divers .....	XLIII
3.2.2.4. Les déchets .....	XLIII
3.2.3. Les enjeux environnementaux .....	XLIV
3.2.3.1. La qualité de l'air .....	XLIV
3.2.3.2. La qualité des eaux .....	XLV
3.2.3.3. La qualité des sols .....	XLVI
3.3. Enjeux scientifiques et pédagogiques .....	XLVIII

<b>PARTIE 1 – CONSTITUTION ET STRUCTURE DES SOLS</b> .....	1
<b>CHAPITRE 1 – LES MINÉRAUX DES SOLS</b> .....	2
Résumé.....	2
1. Composition de la phase solide minérale des sols.....	3
1.1. Composition élémentaire.....	3
1.2. Composition minéralogique.....	4
1.3. Composition granulométrique des sols.....	5
1.3.1. Classes granulométriques des sols.....	5
1.3.2. Distribution pondérale des particules.....	7
1.3.3. Méthodes de détermination de la composition granulométrique.....	8
1.3.3.1. Prétraitements des matériaux terreux préalables à l'analyse granulométrique.....	8
1.3.3.2. Procédés de séparation des particules.....	9
1.3.4. Texture et appellations texturales des sols.....	10
2. Composition et structure des minéraux.....	11
2.1. Ions, liaisons ioniques et arrangements des ions.....	11
2.2. Les silicates primaires.....	12
2.2.1. Les arrangements de base des silicates.....	12
2.2.2. Les micas.....	13
2.3. Les minéraux argileux.....	16
2.3.1. L'argile et les minéraux argileux; définitions et un peu d'histoire.....	16
2.3.2. Caractères généraux de la structure des minéraux argileux.....	18
2.3.2.1. Édifices phylliteux.....	18
2.3.2.2. Classification des minéraux argileux.....	21
2.3.3. Structure des principaux minéraux argileux.....	21
2.3.3.1. Les kaolinites.....	21
2.3.3.2. Les smectites.....	23
2.3.3.3. Les illites.....	24
2.3.3.4. Les chlorites.....	24
2.3.3.5. Les vermiculites.....	24
2.3.4. Structure des minéraux non argileux.....	25
2.3.4.1. Les oxydes, oxyhydroxydes et hydroxydes métalliques.....	25
2.3.4.2. Minéraux amorphes.....	26
2.3.4.3. Autres minéraux.....	28
3. Propriétés des minéraux des sols.....	28
3.1. Propriétés physiques.....	28
3.1.1. Taille et forme des particules minérales.....	28
3.1.2. Aire spécifique de surface.....	30
3.1.2.1. Surfaces concernées et définitions.....	30
3.1.2.2. Principe de la détermination des aires spécifiques de surface.....	31
3.1.2.3. Valeurs de l'aire spécifique de surface.....	31
3.2. Propriétés physicochimiques.....	33
3.2.1. Propriétés de dissolution en milieux aqueux.....	33

3.2.2. Propriétés liées à la présence de surfaces porteuses de charges électriques.....	34
3.2.3. Propriétés d'adsorption des molécules non ionisées.....	36
<b>CHAPITRE 2 – CONSTITUANTS ORGANIQUES DES SOLS</b> .....	44
Résumé.....	44
1. Données historiques et définitions.....	45
2. Les matières organiques mortes.....	46
2.1. Méthodes de séparation des constituants organiques.....	46
2.1.1. Fractionnement physique des constituants organiques.....	46
2.1.1.1. Fractionnement selon le critère dimensionnel.....	47
2.1.1.2. Fractionnement selon le critère densimétrique.....	47
2.1.2. Méthodes chimiques d'extraction et de séparation des constituants organiques.....	49
2.1.2.1. Méthodes basées sur la solubilisation de composés organiques.....	49
2.1.2.2. Méthodes basées sur la destruction des minéraux.....	50
2.1.2.3. Méthode utilisant la destruction des micro-organismes.....	51
2.2. Données générales sur les matières organiques des sols.....	51
2.3. Composition chimique des matières organiques mortes.....	54
2.3.1. Composition élémentaire.....	54
2.3.1.1. Carbone.....	54
2.3.1.2. Azote.....	54
2.3.1.3. Phosphore.....	56
2.3.1.4. Soufre.....	56
2.3.2. Composition moléculaire.....	56
2.3.2.1. Composés organiques individualisés.....	56
2.3.2.2. Les substances humiques.....	59
2.4. Méthodes d'étude des matières organiques mortes.....	61
2.4.1. Méthodes destructives.....	61
2.4.1.1. Méthodes chimiques.....	61
2.4.1.2. Méthodes thermiques.....	62
2.4.2. Méthodes physiques non destructives, méthodes spectroscopiques.....	63
2.5. Propriétés des matières organiques.....	64
2.5.1. Propriétés physiques.....	64
2.5.1.1. Dimensions des particules humiques.....	64
2.5.1.2. Masse moléculaire.....	65
2.5.2. Propriétés chimiques des matières organiques mortes.....	65
2.5.2.1. Ionisation des groupes chimiques fonctionnels.....	65
2.5.2.2. Complexation des cations métalliques.....	66
2.5.2.3. Propriétés de rétention.....	67
2.5.2.4. Stabilité chimique.....	67
2.6. Rôles des matières organiques mortes.....	68
3. Les organismes vivants du sol.....	69
3.1. Caractéristiques générales.....	69
3.1.1. Les facteurs agissant sur les organismes vivants.....	69

3.1.2. Répartition des organismes vivants dans le sol .....	70
3.2. Les micro-organismes du sol .....	70
3.3. La faune du sol .....	71
3.3.1. La microfaune (taille < 0,2 mm) .....	71
3.3.2. La mésofaune (0,2 mm < taille < 4 mm) .....	72
3.3.3. La macrofaune (4 mm < taille < 80 mm) .....	72
3.3.4. La mégafaune (80 mm < taille) .....	72
3.4. Les racines vivantes .....	72
3.5. Les rôles des organismes vivants .....	74
<b>CHAPITRE 3 – LA STRUCTURE DES SOLS</b> .....	82
Résumé .....	82
1. Description de la structure .....	84
1.1. Arrangements de la phase solide .....	84
1.1.1. Description macroscopique .....	84
1.1.1.1. Classification de l'USDA (1951) – Déterminisme pédogénétique .....	85
1.1.1.2. Classification agronomique – Déterminisme cultural .....	86
1.1.2. Description aux échelles microscopiques .....	87
1.1.2.1. Microscopie optique .....	87
1.1.2.2. Microscopie électronique .....	87
1.1.3. Description des assemblages des constituants .....	87
1.1.3.1. Les différents niveaux d'association .....	88
1.1.3.2. Agents de liaison à l'origine des assemblages .....	91
1.1.3.3. Stabilité des assemblages (ou des agrégats) .....	93
1.2. Espace poral .....	94
1.2.1. Morphologie des pores .....	94
1.2.2. Porosité du sol .....	95
1.2.2.1. Porosité totale .....	95
1.2.2.2. Partition de l'espace poral .....	99
1.2.2.3. Distribution des tailles de pores .....	102
2. Genèse et évolution de la structure .....	105
2.1. Facteurs et phénomènes de formation des assemblages (agrégats) .....	105
2.1.1. Facteurs physiques .....	106
2.1.1.1. Influence des régimes hydriques .....	106
2.1.1.2. Influence des régimes thermiques .....	106
2.1.2. Facteurs physicochimiques .....	107
2.1.2.1. Nature des minéraux .....	107
2.1.2.2. Composition ionique de la solution du sol .....	108
2.1.2.3. Composés organiques .....	109
2.1.3. Facteurs biologiques .....	110
2.1.3.1. Les micro-organismes et l'agrégation .....	110
2.1.3.2. La pédofaune et l'agrégation .....	112
2.1.3.3. Les végétaux et l'agrégation .....	112

2.2. Processus de dégradation de la structure .....	113
2.2.1. La destruction des agrégats .....	113
2.2.1.1. Mécanismes .....	113
2.2.1.2. Conséquences .....	114
2.2.2. La cohésion des matériaux terreux et le comportement mécanique des sols ..	114
2.2.2.1. Limites de consistance .....	114
2.2.2.2. Limite de retrait .....	116
2.2.2.3. Résistance à une contrainte mécanique externe .....	117
2.3. Structure du sol et pratiques culturales .....	117
2.3.1. Le travail du sol .....	117
2.3.2. La gestion du stock de carbone organique .....	118
2.3.3. Les apports d'éléments chimiques .....	118

## PARTIE 2 – LES PHÉNOMÈNES DANS LES SOLS .....

<b>CHAPITRE 1 – PHYSICOCHIMIE DES INTERFACES DANS LES SOLS</b> .....	128
Résumé .....	128
1. Notions générales .....	130
2. Interface liquide/gaz (L/G) .....	131
2.1. Tension interfaciale liquide/gaz et énergies de surface .....	131
2.2. Aspects moléculaires .....	132
2.3. Expression et valeurs de la tension interfaciale liquide/gaz .....	133
2.3.1. Influence de la nature chimique du liquide .....	134
2.3.2. Influence de la température .....	134
2.3.3. Influence des solutés .....	134
2.4. Conséquences des tensions interfaciales .....	136
2.4.1. Énergies d'adhésion et de cohésion .....	136
2.4.1.1. Équilibre d'une goutte d'eau sur une surface solide .....	136
2.4.1.2. Expressions des énergies d'adhésion et de cohésion .....	137
2.4.2. Énergies d'un liquide à l'interface liquide/gaz .....	137
2.4.2.1. Loi de Young-Laplace .....	137
2.4.2.2. Loi de Jurin, ascension capillaire .....	138
2.4.2.3. Loi de Kelvin, énergie potentielle de l'eau contenue dans un tube capillaire .....	139
3. Adsorption à l'interface solide/gaz .....	140
3.1. Isothermes d'adsorption .....	140
3.1.1. Obtention des isothermes d'adsorption .....	140
3.1.2. Types d'isothermes d'adsorption .....	141
3.2. Énergies d'adsorption .....	142
3.3. Formulation des isothermes d'adsorption .....	142
3.3.1. Milieux non poreux .....	143
3.3.1.1. Surfaces homogènes, couche adsorbée monomoléculaire .....	143

3.3.1.2. Surface homogène, couche adsorbée plurimoléculaire .....	144
3.3.1.3. Surfaces hétérogènes .....	146
3.3.2. Milieux poreux .....	146
3.4. Adsorption de l'eau par les minéraux argileux .....	148
3.4.1. Observations expérimentales .....	148
3.4.1.1. Influence de la nature minéralogique des solides sur l'adsorption et la désorption de l'eau .....	149
3.4.1.2. Influence de la nature des cations compensateurs sur l'adsorption et la désorption de l'eau .....	150
3.4.2. Étapes et mécanismes de l'adsorption de l'eau .....	152
3.4.2.1. Interactions responsables de l'adsorption des molécules d'eau .....	152
3.4.2.2. Énergies mises en jeu par le processus d'hydratation des minéraux argileux .....	152
4. Interface liquide/solide .....	155
4.1. Adsorption à l'interface liquide/solide (L/S) .....	155
4.1.1. Généralités sur l'adsorption des solutés à l'interface liquide/solide .....	155
4.1.2. Caractéristiques générales de l'adsorption des solutés .....	158
4.1.2.1. Description des méthodes .....	158
4.1.2.2. Facteurs expérimentaux .....	161
4.1.2.3. Cinétiques de l'adsorption et de la désorption .....	162
4.1.2.4. Aspects énergétiques de l'adsorption des solutés .....	166
4.1.3. Adsorption des petites molécules non ionisées .....	169
4.1.3.1. Surfaces adsorbantes et nature des interactions molécules/surface .....	169
4.1.3.2. Isothermes d'adsorption et de désorption .....	171
4.1.3.3. Facteurs de variation des quantités adsorbées des molécules organiques non ionisées .....	176
4.1.4. Adsorption des ions .....	178
4.1.4.1. Les ions du sol et les mécanismes d'adsorption .....	179
4.1.4.2. Les charges électriques portées par les surfaces .....	180
4.1.4.3. Concept de double couche électrique .....	183
4.1.4.4. Données expérimentales .....	187
4.1.4.5. Modélisation des échanges de cations .....	197
4.1.4.6. Le complexe adsorbant des sols et sa composition ionique .....	201
4.2. Phénomènes colloïdaux .....	207
4.2.1. Caractéristiques générales des colloïdes .....	207
4.2.2. Agrégation des colloïdes .....	209
4.2.2.1. Forces interparticulaires .....	209
4.2.2.2. Modélisation de la stabilité colloïdale .....	210
4.2.2.3. Effet de l'adsorption sur la stabilité colloïdale .....	211
4.3. Phénomènes de précipitation et de dissolution .....	213
4.3.1. Nature des phénomènes .....	213
4.3.2. Dissolution et précipitation des minéraux .....	214
4.3.2.1. Caractéristiques générales .....	214
4.3.2.2. Solubilité des oxydes et des hydroxydes .....	221
4.3.2.3. Solubilité des carbonates .....	221
4.3.2.4. Précipitation .....	223

4.3.3. Dissolution et précipitation des composés organiques .....	226
4.3.3.1. Dissolution d'un liquide .....	226
4.3.3.2. Dissolution d'un gaz .....	226
4.3.3.3. Dissolution d'un solide .....	226
4.3.3.4. Caractéristiques thermodynamiques .....	227
4.3.3.5. Dissolution des gaz, partition air/eau .....	228
4.3.3.6. Partition entre les solvants organiques et l'eau, coefficient de partage octanol/eau .....	229
<b>CHAPITRE 2 – PHÉNOMÈNES PHYSIQUES</b> .....	246
Résumé .....	246
1. L'eau dans le sol .....	247
1.1. Rétention de l'eau dans le sol – Hydrostatique du sol .....	247
1.1.1. Teneur en eau .....	248
1.1.1.1. Définitions .....	248
1.1.1.2. Méthodes de détermination des teneurs en eau .....	250
1.1.1.3. Quantité d'eau contenue dans le sol et régimes hydriques .....	257
1.1.2. Énergie potentielle de l'eau dans le sol .....	260
1.1.2.1. Définitions .....	260
1.1.2.2. Énergie potentielle de rétention ou de sorption .....	263
1.1.2.3. Fonctions caractéristiques d'hydratation .....	267
1.1.2.4. Énergie potentielle gravitaire ou potentiel gravitaire .....	272
1.1.2.5. Énergie potentielle hydrostatique ou potentiel hydrostatique .....	273
1.1.2.6. Valeurs de l'énergie potentielle de l'eau dans le sol .....	273
1.2. Transport de l'eau dans le sol – Hydrodynamique du sol .....	276
1.2.1. Équations du transport de l'eau .....	276
1.2.1.1. Équations générales – Lois de conservation .....	276
1.2.1.2. Équations particulières du transport de l'eau .....	278
1.2.1.3. Équation de Richards .....	283
1.2.2. Conductivité hydraulique .....	284
1.2.2.1. Unités .....	284
1.2.2.2. Conductivité hydraulique des milieux saturés en eau .....	285
1.2.2.3. Conductivité hydraulique des milieux non saturés en eau .....	290
1.2.2.4. Diffusivité de l'eau dans les milieux non saturés en eau .....	294
1.2.3. Régimes hydrodynamiques des sols .....	294
1.2.3.1. Définitions – Intérêt agronomique et environnemental .....	294
1.2.3.2. Infiltration de l'eau dans le sol .....	296
1.2.3.3. Redistribution de l'eau .....	303
1.2.3.4. Dessèchement du sol .....	305
2. Transport des solutés .....	307
2.1. Diffusion moléculaire .....	308
2.1.1. Équations de la diffusion moléculaire .....	308
2.1.1.1. Loi de Fick – Définition des coefficients de diffusion moléculaire .....	308
2.1.1.2. Équation de diffusion .....	310
2.1.2. Mécanismes moléculaires de la diffusion .....	311
2.1.2.1. Milieux solides .....	311

2.1.2.2. Milieux liquides.....	311
2.1.2.3. Milieux gazeux.....	312
2.1.3. Diffusion dans les milieux poreux.....	312
2.1.3.1. Milieux saturés en eau.....	312
2.1.3.2. Diffusion dans un milieu poreux non saturé en eau.....	314
2.1.4. Valeurs du coefficient de diffusion moléculaire.....	315
2.2. Convection-dispersion.....	317
2.2.1. Le processus de convection-dispersion.....	317
2.2.1.1. Mise en évidence expérimentale.....	317
2.2.1.2. Mécanismes de la dispersion.....	319
2.2.2. Description mathématique.....	319
2.2.2.1. Établissement de l'équation.....	319
2.2.2.2. Solutions de l'équation de convection-dispersion.....	321
2.2.3. Le coefficient de dispersion hydrodynamique.....	325
2.2.4. Observations sur la dispersion hydrodynamique en milieu poreux.....	326
2.2.4.1. Différents types de courbes d'élution observés.....	326
2.2.4.2. Facteurs influençant la dispersion hydrodynamique.....	327
2.2.5. Transports préférentiels.....	329
2.2.5.1. Quelques exemples de transferts préférentiels.....	329
2.2.5.2. Modélisation des transferts préférentiels.....	331
2.2.6. Méthodes d'étude des transports de solutés par convection-dispersion.....	332
2.2.6.1. Méthodes basées sur la détermination des quantités de solutés.....	332
2.2.6.2. Méthodes basées sur l'utilisation d'isotopes.....	335
3. Transports en phase gazeuse.....	336
3.1. Expression du coefficient de diffusion moléculaire.....	336
3.2. Facteurs de la diffusion moléculaire en phase gazeuse.....	336
3.2.1. Propriétés des molécules.....	336
3.2.1.1. Solubilité dans l'eau.....	336
3.2.1.2. Le coefficient de Henry.....	337
3.2.2. Hydratation et structure du milieu de diffusion.....	337
4. Propriétés thermiques.....	341
4.1. Bilan énergétique du sol.....	341
4.1.1. Les échanges radiatifs.....	341
4.1.1.1. Rayonnement solaire.....	341
4.1.1.2. Rayonnement terrestre.....	341
4.1.1.3. Rayonnement net.....	341
4.1.2. Autres échanges.....	342
4.1.2.1. Échanges de chaleur sensible.....	342
4.1.2.2. Échanges de chaleur latente.....	342
4.1.3. Bilan d'énergie.....	342
4.2. Propriétés thermiques des sols.....	342
4.2.1. Capacité thermique des sols.....	342
4.2.2. Transport de la chaleur dans le sol.....	343
4.2.2.1. Transferts par convection.....	343
4.2.2.2. Transferts par conduction.....	343
4.3. Régimes thermiques des sols.....	344

CHAPITRE 3 – TRANSFORMATIONS CHIMIQUES.....	365
Résumé.....	365
1. Réactions d'ionisation.....	367
1.1. L'ionisation dans les sols.....	367
1.2. Définition de la constante d'acidité.....	368
1.3. Valeurs de la constante d'acidité.....	369
1.3.1. Domaines des valeurs observées.....	369
1.3.2. Ionisation et pH.....	370
2. Réactions de complexation des métaux.....	371
2.1. Nature des complexes métalliques.....	371
2.2. Complexes oxo et hydroxo.....	372
2.3. Complexes avec les molécules organiques.....	374
2.3.1. Classification des cations.....	374
2.3.1.1. Cations de type A.....	374
2.3.1.2. Cations de type B.....	374
2.3.1.3. Cations des métaux de transition (ex. : $\text{Co}^{2+}$ , $\text{Ni}^{2+}$ , $\text{Cu}^{2+}$ , $\text{Cr}^{3+}$ , $\text{Fe}^{3+}$ ).....	374
2.3.2. Les ligands organiques.....	375
2.3.3. Constantes de stabilité des complexes métalliques.....	376
3. Phénomènes d'oxydoréduction.....	377
3.1. Le phénomène d'oxydoréduction.....	377
3.2. Description thermodynamique des réactions d'oxydoréduction.....	378
3.2.1. Le concept d'activité de l'électron en solution aqueuse.....	378
3.2.2. Constante d'équilibre des réactions d'oxydoréduction.....	379
3.2.3. Diagrammes <i>pe</i> -pH.....	381
3.2.4. Domaines de variation de <i>pe</i> .....	383
3.3. Rôle des micro-organismes.....	385
4. Transformations chimiques des composés organiques.....	386
4.1. Principales réactions chimiques.....	387
4.1.1. Réactions non réductives par substitutions nucléophiles.....	387
4.1.1.1. Caractères généraux.....	387
4.1.1.2. Déplacements nucléophiles d'atomes d'halogène.....	388
4.1.1.3. Hydrolyse des dérivés acides.....	389
4.1.2. Réactions d'oxydoréduction.....	391
4.2. Humification.....	392
4.2.1. La théorie de la lignine.....	392
4.2.2. La théorie des polyphénols.....	393
4.2.2.1. Sources de polyphénols.....	393
4.2.2.2. Formation et combinaisons des quinones.....	394
4.2.3. Combinaisons des sucres et des amines.....	394
4.2.4. Formation d'associations supramoléculaires de composés organiques.....	394
5. Aspects cinétiques.....	395
5.1. Lois de vitesse en milieux homogènes.....	395
5.1.1. Description phénoménologique, réactions d'ordre 1.....	395
5.1.2. Influence de la température sur le coefficient de vitesse.....	398

5.2. Réactions enzymatiques .....	400	2.1.1. Le pH de la solution du sol.....	434
5.2.1. Quelques données générales sur les enzymes .....	400	2.1.1.1. Définitions, pH d'une solution et pH des sols .....	434
5.2.1.1. Les oxydoréductases.....	400	2.1.1.2. Origine des protons et pH des sols.....	435
5.2.1.2. Les transférases.....	400	2.1.1.3. Grandeurs dérivées.....	436
5.2.1.3. Les hydrolases .....	401	2.1.2. Salinité et sodicité des sols .....	438
5.2.1.4. Les lyases.....	401	2.1.2.1. La conductivité électrique, $CE_{sat}$ , de l'extrait de pâte saturée.....	439
5.2.1.5. Les isomérases.....	401	2.1.2.2. Quantité de sodium adsorbé .....	439
5.2.1.6. Les ligases.....	401	2.1.2.3. Le pourcentage de sodium adsorbé (Exchangeable Sodium Percentage = ESP).....	439
5.2.2. Cinétiques enzymatiques .....	401	2.2. Composition de la solution du sol .....	440
5.3. Réactions chimiques de surface .....	403	2.2.1. Extraction de la solution du sol .....	440
5.4. Cinétiques apparentes des transformations chimiques .....	406	2.2.2. Composition moyenne.....	441
5.4.1. Transformations abiotiques.....	406	3. Composition de la phase gazeuse du sol.....	443
5.4.2. Transformations biochimiques .....	407	4. Facteurs de la dynamique des éléments chimiques dans le sol .....	445
 		4.1. Composition des matières organiques non transformées .....	446
<b>PARTIE 3 – LES PROCESSUS PÉDOLOGIQUES ET LEURS APPLICATIONS</b> .....	417	4.2. Facteurs climatiques .....	447
<b>CHAPITRE 1 – DYNAMIQUE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES DANS LES SOLS</b> .....	419	4.3. Facteurs pédologiques .....	448
Résumé .....	419	4.3.1. La phase solide du sol : les minéraux et la structure .....	448
1. Processus .....	420	4.3.2. Influence de la composition de la solution du sol.....	449
1.1. Éléments non métalliques.....	420	4.3.3. Facteurs biologiques .....	449
1.1.1. Caractéristiques générales .....	420	4.4. Facteurs anthropiques, modalités d'utilisation des sols .....	449
1.1.2. Aspects propres à chaque élément chimique .....	422	4.4.1. Nature du couvert végétal .....	450
1.1.2.1. Carbone.....	422	4.4.2. Apports au sol de matières organiques .....	451
1.1.2.2. Azote .....	423	4.4.3. Le travail du sol .....	452
1.1.2.3. Phosphore.....	425	4.5. Présentation résumée des effets des facteurs agissant sur la minéralisation.....	453
1.1.2.4. Soufre .....	426	5. Modélisation de la dynamique des éléments chimiques dans le sol.....	454
1.2. Métaux alcalins et alcalinoterreux .....	427	5.1. Considérations générales.....	454
1.2.1. Métaux alcalins .....	427	5.2. Quelques références de modèles .....	455
1.2.1.1. Sodium .....	427	5.2.1. Matières organiques, éléments C, N, P et S .....	455
1.2.1.2. Potassium.....	427	5.2.2. Autres éléments chimiques .....	457
1.2.2. Métaux alcalinoterreux.....	428	5.3. Limites des modèles numériques .....	457
1.2.2.1. Calcium.....	428	5.3.1. Limites phénoménologiques .....	457
1.2.2.2. Magnésium .....	428	5.3.2. Limites liées à la connaissance des milieux .....	458
1.3. Autres éléments.....	428	5.3.3. Limites relatives aux modalités de mise en œuvre des modèles .....	458
1.3.1. Macroéléments .....	428	<b>CHAPITRE 2 – LA FONCTION « MILIEU BIOLOGIQUE » DES SOLS</b> .....	470
1.3.1.1. Transformations conduisant à l'altération de minéraux.....	428	Résumé .....	470
1.3.1.2. Transformations conduisant à la synthèse de minéraux .....	431	1. Physique de la fonction « milieu biologique » .....	472
1.3.2. Microéléments ou éléments en traces .....	431	1.1. L'eau et les organismes vivants du sol.....	473
1.3.2.1. Adsorption/désorption .....	431	1.1.1. Schéma général de la circulation de l'eau dans le sol et dans la biosphère.....	473
1.3.2.2. Précipitation/dissolution .....	432	1.1.2. Biodisponibilité de l'eau dans le sol.....	474
1.3.2.3. Oxydoréduction .....	432	1.1.3. Alimentation hydrique des plantes.....	475
1.3.2.4. Les états des éléments traces et leur localisation.....	432	1.1.3.1. Le système sol/plante/atmosphère .....	475
2. La solution du sol .....	433	1.1.3.2. Le transfert de l'eau entre le sol et la racine.....	477
2.1. Caractéristiques physicochimiques de la solution du sol .....	434		

1.1.3.3. Transport dans la plante .....	480
1.1.3.4. Évapotranspiration .....	481
1.1.4. Le bilan hydrique .....	482
1.1.4.1. Définition et composantes .....	482
1.1.4.2. Méthodes d'estimation des termes du bilan hydrique .....	484
1.1.4.3. Applications .....	486
1.2. La température et les organismes vivants du sol .....	488
1.3. Propriétés mécaniques .....	489
2. Physicochimie de la fonction « milieu biologique » .....	491
2.1. Interactions avec la phase solide du sol .....	491
2.2. La solution du sol et les organismes vivants .....	492
2.2.1. Acidité du sol .....	492
2.2.1.1. Effets sur les organismes vivants .....	493
2.2.1.2. Correction du pH des sols .....	494
2.2.2. Salinité et sodicité des sols .....	495
2.2.2.1. Effets sur les plantes .....	495
2.2.2.2. Conséquences pratiques .....	496
2.3. Les organismes vivants et la phase gazeuse du sol .....	497
2.3.1. Aération et croissance des plantes .....	498
2.3.2. Aération et activité microbienne .....	499
2.3.3. Le rôle de l'aération du sol .....	499
3. Biologie de la fonction « milieu biologique » .....	500
3.1. Les rhizodépôts .....	502
3.2. Les transformations chimiques dans la rhizosphère .....	503
3.3. Interrelations entre les organismes vivants dans la rhizosphère .....	503
3.3.1. Interrelations micro-organismes/plantes .....	503
3.3.1.1. Actions des plantes sur les micro-organismes .....	503
3.3.1.2. Actions des micro-organismes sur les plantes .....	504
3.3.2. Interrelations micro-organismes/faune .....	504
3.3.3. Relations entre plantes .....	504
4. Biodisponibilité des substances dans le sol .....	505
4.1. Problématique .....	505
4.2. Processus déterminant le prélèvement par les plantes .....	507
4.2.1. L'absorption racinaire .....	507
4.2.1.1. L'interface sol/racine et les mécanismes de l'absorption .....	507
4.2.1.2. Cinétique de l'absorption .....	509
4.2.2. Influence de la mobilisation-immobilisation des solutés .....	510
4.2.3. Transport et distribution des solutés au voisinage de la racine .....	510
4.2.4. Les surfaces absorbantes .....	514
4.2.4.1. Développement racinaire .....	514
4.2.4.2. Rôle des mycorhizes .....	515
4.3. Modélisation du prélèvement par les plantes .....	516
4.4. Quantités de substances biodisponibles dans le sol .....	517
4.4.1. Macronutriments N, P et S .....	517
4.4.1.1. Les formes inorganiques .....	519

4.4.1.2. Les formes organiques .....	524
4.4.2. Macronutriments métalliques .....	526
4.4.2.1. Potassium .....	526
4.4.2.2. Autres éléments métalliques .....	530
4.4.3. Éléments en traces .....	530
4.4.3.1. États physicochimiques des éléments en traces dans le sol .....	530
4.4.3.2. Estimation des quantités biodisponibles .....	532
4.4.4. Composés organiques xénobiotiques .....	533
4.4.4.1. Phénomènes impliqués .....	535
4.4.4.2. Estimation des quantités biodisponibles .....	536
<b>CHAPITRE 3 – LA FONCTION ENVIRONNEMENTALE DES SOLS .....</b>	<b>541</b>
Résumé .....	541
1. Processus de dégradation des sols .....	544
1.1. Dégradation physique des sols .....	545
1.1.1. Les processus de dégradation physique .....	545
1.1.2. L'érosion des sols .....	546
1.1.2.1. Modalités d'écoulement de l'eau et érosion hydrique .....	546
1.1.2.2. Les facteurs de l'érosion .....	547
1.1.2.3. Conséquences de la dégradation physique des sols .....	549
1.1.2.4. Estimation des risques d'érosion .....	551
1.2. Dégradation chimique .....	552
1.2.1. Causes et origines de la dégradation chimique .....	552
1.2.2. Dégradation par des substances chimiques .....	553
1.2.2.1. Pluies acides .....	553
1.2.2.2. Les sels inorganiques/La salinisation .....	553
1.2.2.3. Éléments en traces .....	554
1.2.2.4. Polluants organiques .....	555
1.2.2.5. Nanomatériaux .....	556
1.2.3. Dégradation chimique par appauvrissement .....	556
1.2.3.1. Les pertes de matériaux terreux par érosion .....	556
1.2.3.2. La diminution de la capacité des sols à retenir les nutriments .....	556
1.2.3.3. La minéralisation excessive des matières organiques .....	557
1.2.3.4. Absence de restitution des matières organiques .....	557
1.2.3.5. Les prélèvements excessifs de nutriments dus à des pratiques culturales inappropriées .....	557
1.2.4. Conséquences de la dégradation chimique des sols .....	557
1.3. Dégradation biologique .....	559
1.3.1. Dégradation biologique et appauvrissement en carbone organique .....	559
1.3.2. Dégradation biologique des sols et substances polluantes .....	560
2. Qualité des sols .....	561
2.1. Protection et amélioration des sols .....	561
2.1.1. Prévention de la dégradation chimique des sols et pratiques d'amélioration ..	561
2.1.1.1. Salinisation et sodisation .....	561
2.1.1.2. Dégradation par les polluants .....	561
2.1.1.3. Dégradation par appauvrissement .....	563

2.1.1.4. Dégradation par acidification .....	564
2.1.2. Prévention de la dégradation physique des sols et pratiques d'amélioration ..	564
2.2. Estimation de la qualité des sols .....	565
2.2.1. Utilisation de valeurs seuils .....	566
2.2.1.1. Une seule caractéristique est considérée .....	566
2.2.1.2. Combinaisons de caractéristiques .....	567
2.2.2. Utilisation d'indices globaux .....	567
2.2.2.1. Indicateurs non quantitatifs .....	567
2.2.2.2. Indicateurs globaux quantitatifs .....	568
3. Les sols et la qualité chimique des eaux .....	570
3.1. Problématique générale .....	570
3.1.1. Critères de qualité des eaux .....	570
3.1.2. Le double rôle du sol .....	570
3.2. Transport dans les eaux des éléments chimiques non métalliques .....	572
3.2.1. Carbone organique des matières organiques .....	572
3.2.2. Azote inorganique .....	572
3.2.2.1. Anion nitrate .....	572
3.2.2.2. Cation ammonium .....	573
3.2.2.3. Aspects agri-environnementaux .....	575
3.2.3. Phosphore inorganique .....	579
3.2.4. Composés organiques xénobiotiques .....	581
3.2.4.1. Déterminisme de la pollution des eaux par les composés organiques xénobiotiques .....	582
3.2.4.2. Rétention des composés organiques xénobiotiques .....	583
3.2.4.3. Dégradation des composés organiques xénobiotiques .....	585
3.2.5. Éléments métalliques .....	587
4. Le sol et la qualité chimique de l'air .....	589
4.1. Gaz à effet de serre .....	590
4.1.1. Sources et évolution de la pollution .....	590
4.1.2. Rôles du sol .....	590
4.2. Composés précurseurs d'acides .....	592
4.3. Pesticides .....	593
4.3.1. Les pesticides dans l'atmosphère : concentrations et flux .....	593
4.3.2. Les transports de pesticides à partir du sol .....	594
4.3.2.1. Différents types de transport .....	594
4.3.2.2. La volatilisation .....	595

BIBLIOGRAPHIE .....	610
LISTE DES FIGURES .....	655
LISTE DES TABLEAUX .....	666
LISTE DES NOTES COMPLÉMENTAIRES .....	671
INDEX .....	675
FIGURES EN COULEURS .....	679

**Cette nouvelle édition est une présentation actualisée et synthétique des connaissances sur la constitution, les propriétés et les fonctions des sols.**

**Première partie, les constituants minéraux et organiques, leurs principales caractéristiques chimiques et physiques et leurs arrangements.**

**Deuxième partie, les phénomènes physicochimiques, chimiques et physiques :**

- les phénomènes aux interfaces entre les phases solide, liquide et gazeuse du sol ;
- les phénomènes de transport d'eau et de substances chimiques ;
- les transformations chimiques abiotiques et biochimiques.

**Troisième partie, applications des connaissances à trois ensembles de processus :**

- la dynamique des éléments chimiques dans le sol en relation avec leurs cycles biogéochimiques ;
- la fonction du sol en tant que milieu biologique pour les organismes vivants du sol, notamment à l'égard de la biodisponibilité de l'eau, des éléments chimiques et des substances chimiques fertilisantes et polluantes ;
- la fonction environnementale des sols résultant de leur rôle comme réacteurs biogéochimiques, siège de rétentions, de dégradations et de transferts mais aussi sources de substances à caractère polluant. Ses caractéristiques sont appliquées à la description de ses conséquences sur la qualité de l'air, des eaux et des sols eux-mêmes, tant des points de vue chimique, physique que biologique.

Ces connaissances se placent dans un contexte relatif à d'importantes préoccupations comme la production d'aliments et de fibres dans le cadre d'une agriculture durable, la conservation des sols et la protection de la qualité des eaux et de l'air. Les réponses à ces préoccupations passent en grande partie par la compréhension des processus qui se déroulent dans la biosphère continentale et dans les sols en particulier. En effet, les exposés montrent comment les sols sont une plaque tournante de la biogéodynamique des éléments chimiques, sont des milieux qui assurent la croissance et le développement de nombreux organismes vivants animaux et végétaux et qu'ils jouent un rôle considérable dans le déterminisme de la qualité des milieux naturels.

*Raoul Calvet est ingénieur agronome, docteur ès sciences physiques et professeur honoraire à l'Institut national agronomique Paris-Grignon.*

ISBN : 978-2-85557-244-4



9 782855 572444

 ÉDITIONS  
France Agricole