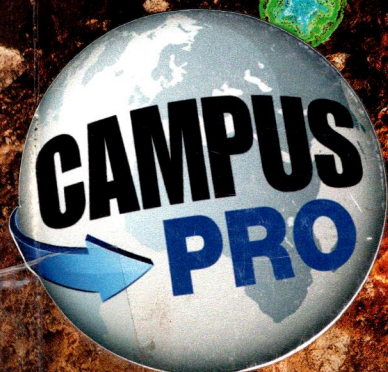


Le SOL

- ❑ 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^e édition



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.*

6288260

CAMPUS LE SOL



9 782855 572703

 ÉDITIONS
France Agricole

Sommaire



AVANT-PROPOS XXI

INTRODUCTION XXIII

DÉFINITIONS ET FONCTIONS DES SOLS :

CONTEXTES ET ENJEUX DE LA SCIENCE DU SOL

Résumé	XXIV
1. Un peu d'histoire	XXIV
2. Qu'est-ce que le sol ?	XXV
2.1. Les diverses perceptions du sol	XXVII
2.2. La science du sol	XXVII
2.3. Les fonctions du sol	XXXII
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

PARTIE 1 – CONSTITUTION ET STRUCTURE DES SOLS	1
CHAPITRE 1 – LES MINÉRAUX DES SOLS	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

CHAPITRE 2 – CONSTITUANTS ORGANIQUES DES SOLS

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	56
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	59
2.3.2.2. Les substances humiques	61
2.4. Méthodes d'étude des matières organiques mortes	61
2.4.1. Méthodes destructives	61
2.4.1.1. Méthodes chimiques	62
2.4.1.2. Méthodes thermiques	63
2.4.2. Méthodes physiques non destructives, méthodes spectroscopiques	64
2.5. Propriétés des matières organiques	64
2.5.1. Propriétés physiques	64
2.5.1.1. Dimensions des particules humiques	65
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	66
2.5.2.2. Complexation des cations métalliques	67
2.5.2.3. Propriétés de rétention	67
2.5.2.4. Stabilité chimique	68
2.6. Rôles des matières organiques mortes	69
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
CHAPITRE 3 – LA STRUCTURE DES SOLS	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 127

CHAPITRE 1 – PHYSICOCHIMIE DES INTERFACES DANS LES SOLS.	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	227
4.3.3.4. Caractéristiques thermodynamiques	228
4.3.3.5. Dissolution des gaz, partition air/eau	
4.3.3.6. Partition entre les solvants organiques et l'eau, coefficient de partage octanol/eau	229

CHAPITRE 2 – PHÉNOMÈNES PHYSIQUES

Résumé	246
1. L'eau dans le sol	247
1.1. Rétention de l'eau dans le sol – Hydrostatique du sol	248
1.1.1. Teneur en eau	248
1.1.1.1. Définitions	250
1.1.1.2. Méthodes de détermination des teneurs en eau	257
1.1.1.3. Quantité d'eau contenue dans le sol et régimes hydriques	260
1.1.2. Énergie potentielle de l'eau dans le sol	260
1.1.2.1. Définitions	263
1.1.2.2. Énergie potentielle de rétention ou de sorption	267
1.1.2.3. Fonctions caractéristiques d'hydratation	272
1.1.2.4. Énergie potentielle gravitaire ou potentiel gravitaire	273
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	276
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	278
1.2.1.2. Équations particulières du transport de l'eau	283
1.2.1.3. Équation de Richards	284
1.2.2. Conductivité hydraulique	284
1.2.2.1. Unités	285
1.2.2.2. Conductivité hydraulique des milieux saturés en eau	290
1.2.2.3. Conductivité hydraulique des milieux non saturés en eau	294
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	296
1.2.3.2. Infiltration de l'eau dans le sol	303
1.2.3.3. Redistribution de l'eau	305
1.2.3.4. Dessèchement du sol	307
2. Transport des solutés	308
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	310
2.1.1.2. Équation de diffusion	311
2.1.2. Mécanismes moléculaires de la diffusion	311
2.1.2.1. Milieux solides	

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.: Co^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Cr^{3+} , 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 pe-pH	381
3.2.4. Domaines de variation de pe	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
5.2.1. Quelques données générales sur les enzymes	400
5.2.1.1. Les oxydoréductases	400
5.2.1.2. Les transférases	400
5.2.1.3. Les hydrolases	401
5.2.1.4. Les lyases	401
5.2.1.5. Les isomérases	401
5.2.1.6. Les ligases	401
5.2.2. Cinétiques enzymatiques	401
5.3. Réactions chimiques de surface	403
5.4. Cinétiques apparentes des transformations chimiques	406
5.4.1. Transformations abiotiques	406
5.4.2. Transformations biochimiques	407

PARTIE 3 – LES PROCESSUS PÉDOLOGIQUES ET LEURS APPLICATIONS

417

CHAPITRE 1 – DYNAMIQUE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES DANS LES SOLS

419

Résumé

419

1. Processus

420

 1.1. Éléments non métalliques

420

 1.1.1. Caractéristiques générales

420

 1.1.2. Aspects propres à chaque élément chimique

422

 1.1.2.1. Carbone

422

 1.1.2.2. Azote

423

 1.1.2.3. Phosphore

425

 1.1.2.4. Soufre

426

 1.2. Métaux alcalins et alcalinoterreux

427

 1.2.1. Métaux alcalins

427

 1.2.1.1. Sodium

427

 1.2.1.2. Potassium

427

 1.2.2. Métaux alcalinoterreux

428

 1.2.2.1. Calcium

428

 1.2.2.2. Magnésium

428

 1.3. Autres éléments

428

 1.3.1. Macroéléments

428

 1.3.1.1. Transformations conduisant à l'altération de minéraux

428

 1.3.1.2. Transformations conduisant à la synthèse de minéraux

43

 1.3.2. Microéléments ou éléments en traces

43

 1.3.2.1. Adsorption/désorption

43

 1.3.2.2. Précipitation/dissolution

43

 1.3.2.3. Oxydoréduction

43

 1.3.2.4. Les états des éléments traces et leur localisation

43

2. La solution du sol

43

 2.1. Caractéristiques physicochimiques de la solution du sol

43

2.1.1.	Le pH de la solution du sol.	434
2.1.1.1.	Définitions, pH d'une solution et pH des sols	434
2.1.1.2.	Origine des protons et pH des sols.	435
2.1.1.3.	Grandeurs dérivées.	436
2.1.2.	Salinité et sodicité des sols	438
2.1.2.1.	La conductivité électrique, CE_{sat} , de l'extrait de pâte saturée.	439
2.1.2.2.	Quantité de sodium adsorbé	439
2.1.2.3.	Le pourcentage de sodium adsorbé (Exchangeable Sodium Percentage = ESP).	439
2.2.	Composition de la solution du sol	440
2.2.1.	Extraction de la solution du sol	440
2.2.2.	Composition moyenne.	441
3.	Composition de la phase gazeuse du sol	443
4.	Facteurs de la dynamique des éléments chimiques dans le sol	445
4.1.	Composition des matières organiques non transformées	446
4.2.	Facteurs climatiques	447
4.3.	Facteurs pédologiques	448
4.3.1.	La phase solide du sol : les minéraux et la structure	448
4.3.2.	Influence de la composition de la solution du sol.	449
4.3.3.	Facteurs biologiques	449
4.4.	Facteurs anthropiques, modalités d'utilisation des sols	449
4.4.1.	Nature du couvert végétal	450
4.4.2.	Apports au sol de matières organiques	451
4.4.3.	Le travail du sol	452
4.5.	Présentation résumée des effets des facteurs agissant sur la minéralisation.	453
5.	Modélisation de la dynamique des éléments chimiques dans le sol	454
5.1.	Considérations générales.	454
5.2.	Quelques références de modèles	455
5.2.1.	Matières organiques, éléments C, N, P et S	455
5.2.2.	Autres éléments chimiques	457
5.3.	Limites des modèles numériques	457
5.3.1.	Limites phénoménologiques	457
5.3.2.	Limites liées à la connaissance des milieux	458
5.3.3.	Limites relatives aux modalités de mise en œuvre des modèles.	458

CHAPITRE 2 – LA FONCTION « MILIEU BIOLOGIQUE » DES SOLS 470

Résumé 470

1. Physique de la fonction « milieu biologique » 472

1.1. L'eau et les organismes vivants du sol. 473

1.1.1. Schéma général de la circulation de l'eau dans le sol et dans la biosphère. 473

1.1.2. Biodisponibilité de l'eau dans le sol. 474

1.1.3. Alimentation hydrique des plantes. 475

1.1.3.1. Le système sol/plante/atmosphère. 475

1.1.3.2. Le transfert de l'eau entre le sol et la racine. 477

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

CHAPITRE 3 – LA FONCTION ENVIRONNEMENTALE DES SOLS	541
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