

SOUS LA DIRECTION DE PH. DUCHAUFOUR ET B. SOUCHIER

PÉDOLOGIE

2. Constituants et propriétés du sol

M. Bonneau B. Souchier



8641



MASSON

GL 46

C UNIVERSITAIRE DE TIZI-OUZOU
BIBLIOTHÈQUE
N° 8641

PÉDOLOGIE

SOUS LA DIRECTION DE

Philippe DUCHAUFOUR
Directeur honoraire,
Centre de pédologie du C. N. R. S.

Bernard SOUCHIER
Directeur,
Centre de pédologie du C. N. R. S.

N° DE COTE ~~8641~~ / 3

2

8641
3/3



CONSTITUANTS ET PROPRIÉTÉS DU SOL

T 171/3

PAR

Maurice BONNEAU et Bernard SOUCHIER

AVEC LA COLLABORATION DE

- F. ANDREUX, J. BERTHELIN, R. BLANCHET, S. BRUCKERT,
- J. CHAUSSIDON, A. P. CONESA, M. COPPENET, P. DUTIL,
- J. C. FARDEAU, N. FEDOROFF, B. GUILLET, J. HEBERT,
- M. JAMAGNE, C. JUSTE, F. LELONG, G. LEVY,
- Mme S. MERIAUX, G. PEDRO, M. ROBERT, J. ROUILLER,
- Mme G. SIMON-SYLVESTRE, F. TOUTAIN, S. TROCMÉ,
- J. C. VÉDY



MASSON

Paris New York Barcelone Milan

1979



8641

TABLE DES MATIÈRES

Contents, see p. XVIII

<i>Avant-propos</i>	v
Première partie	
LES CONSTITUANTS DU SOL	1
CHAPITRE PREMIER. — <i>Méthodes d'identification et de quantification des constituants</i>	1
I. Généralités : le complexe d'altération des sols.	1
II. Méthodes d'identification et de séparation des constituants.	2
1. Principe, 2; 2. Méthodologie proposée, 3; 3. Justification et critiques de la méthode, 3.	
III. Quantification : exemples de reconstitution de complexes d'altération type.	7
IV. Bilans d'altération	12
Bibliographie.	15
CHAPITRE II. — <i>Les oxyhydroxydes amorphes et cristallins dans les sols (fer, aluminium, manganèse, silicium)</i>	16
I. Généralités	16
1. Origines et principes d'évolution, 16; 2. Rappel : domaines d'existence des ions et solubilité, 17.	
II. Les oxyhydroxydes de fer.	19
1. Forme ionique ou échangeable, 19; 2. Formes complexées ou amorphes, 20;	
3. Formes cristallines des oxydes de fer, 20.	
III. Les hydroxydes et oxydes d'aluminium.	24
1. Formes ionique et échangeable. Cations hydroxylés et polymères, 24;	
2. Formes complexées et amorphes, 25; 3. Les formes cristallines de l'aluminium, 26.	
Conclusion : Rôles comparés du fer et de l'aluminium dans la pédogenèse.	27
IV. La silice	27
1. Silice soluble, 28; 2. Silice amorphe, 28.	
Conclusion : Rôle de la silice dans la pédogenèse	30
V. Le manganèse	30
1. Formes solubles et complexées, 30; 2. Les oxydes supérieurs insolubles, 31.	
VI. Le titane	31

VII. Méthodologies d'extraction et applications à quelques types de sols.	32
1. <i>Fer, aluminium et manganèse échangeables</i> , 32; 2. <i>Fer, aluminium complexés</i> , 32; 3. <i>Formes amorphes</i> , 33; 4. <i>Formes cristallisées</i> , 33; 5. <i>Applications à quelques types de sols</i> , 34.	
<i>Bibliographie</i>	35
CHAPITRE III. — Les minéraux argileux	38
I. Introduction générale	38
II. Structure et constitution cristallochimique des principaux types de feuillets élémentaires	39
1. <i>Plans anioniques élémentaires</i> , 39; 2. <i>Caractérisation générale des feuillets élémentaires. Feuillet simple et feuillet composé</i> , 39; 3. <i>Constitution des feuillets simples. Présentation de la structure idéale</i> , 41; 4. <i>Constitution du feuillet de type chlorite</i> , 43; 5. <i>Substitutions isomorphiques. Leurs conséquences cristallochimiques</i> , 44.	
III. Structure et constitution des édifices phylliteux classiques.	45
1. <i>Problème de l'empilement des feuillets</i> , 45; 2. <i>Constitution des espaces interfoliaires</i> , 47; 3. <i>Caractérisation structurale et cristallochimique des principales espèces minéralogiques</i>	49
IV. Nature des autres édifices argilo-phylliteux.	53
1. <i>Édifices de transformation (smectites)</i> , 53; 2. <i>Édifices intergrades</i> , 53; 3. <i>Édifices interstratifiés</i> , 55.	
V. Structure et constitution des pseudophyllites. Argiles fibreuses.	55
<i>Bibliographie</i>	56
CHAPITRE IV. — Les conditions de formation des constituants secondaires	58
I. Cadre général de l'évolution pédogéochimique.	58
1. <i>Présentation du système d'évolution pédologique</i> , 58; 2. <i>Rôle des conditions physico-chimiques : mise en évidence des principaux mécanismes de l'évolution pédologique</i> , 59.	
II. L'altération des roches aluminosilicatées et la formation des minéraux secondaires au cours de la pédogenèse.	60
A. Altération hydrolytique, 60.	
1. <i>Mise en évidence des processus cristallochimiques</i> , 60; 2. <i>Caractérisation pédogéochimique et conséquences génétiques</i> , 62; 3. <i>Conditions de développement</i> , 63.	
B. Altération acidolytique.	66
1. <i>Définition des principaux processus acidolytiques</i> , 66; 2. <i>Caractérisation pédogéochimique</i> , 66; 3. <i>Conditions de mise en œuvre</i> , 67.	
III. Synthèse géographique et zonalité des processus pédogéochimiques.	68
<i>Bibliographie</i>	71
CHAPITRE V. — Signification écologique du complexe d'altération. Importance relative des facteurs généraux et stationnels	73

I. L'origine des matériaux soumis à la pédogenèse.	73
A. Apports de matériaux nouveaux en surface.	74
1. <i>Méthodes de caractérisation des apports</i> , 74; 2. <i>Conséquences des apports sur la pédogenèse</i> , 75.	
B. Héritage des matériaux d'altération ancienne.	77
1. <i>Différents types d'héritage</i> , 77; 2. <i>Incidences pédogénétiques</i> , 78.	
C. Le problème des arènes granitiques tempérées.	80
1. <i>Caractéristiques générales des arènes</i> , 80; 2. <i>Variabilité des arènes</i> , 81; 3. <i>Incidences pédogénétiques</i> , 81.	
D. Origine des argiles plastiques et lithomarges des régions intertropicales.	83
II. Écologie des complexes d'altération des sols.	84
A. Influence du climat.	84
B. Influence de la lithologie	85
1. <i>En milieu tempéré</i> , 85; 2. <i>En milieu tropical et équatorial</i> , 86.	
C. Influence de la situation topographique.	88
D. Rôle des facteurs biologiques : la végétation.	89
1. <i>Concentration d'éléments en surface par le jeu du cycle biogéochimique</i> , 90; 2. <i>Enrésinement des forêts feuillues tempérées</i> , 91; 3. <i>Mise en culture</i> , 91.	
III. Conclusions	92
<i>Bibliographie</i>	94
CHAPITRE VI. — Genèse et propriétés des molécules humiques	97
I. Définitions et généralités	97
II. Transformation des précurseurs humiques.	98
A. Mécanismes lytiques.	98
1. <i>Lyse des parois cellulaires</i> , 98; 2. <i>Protéolyse</i> , 99; 3. <i>Ligninolyse</i> , 99; 4. <i>Libération des polyphénols non apparentés à la lignine</i> , 100; 5. <i>Transformations d'autres constituants organiques</i> , 101.	
B. Brunissement et mélanisation.	102
1. <i>Condensation des hydrates de carbone</i> , 102; 2. <i>Condensation des polyphénols</i> , 103; 3. <i>Composés hérités</i> , 104.	
C. Données fondamentales de la synthèse humique.	104
1. <i>La participation des composés azotés</i> , 105; 2. <i>L'influence directrice des polyphénols les plus oxydables</i> , 105; 3. <i>Le concept du nucleus et de chaînes latérales</i> , 105; 4. <i>Facteurs de différenciation entre acides fulviques et humiques</i> , 106.	
III. Technologie des matières humiques.	108
A. Fractionnement et purification	108
B. Absorption de la lumière et encombrements moléculaires.	108
1. <i>Densité optique</i> , 108; 2. <i>Encombrements moléculaires et configurations</i> , 109.	
C. Analyse élémentaire et fonctionnelle.	110
1. <i>Analyse élémentaire</i> , 110; 2. <i>Analyse fonctionnelle par voie chimique</i> , 111; 3. <i>Analyse fonctionnelle par spectroscopie</i> , 112.	

D. Dégradations chimiques	113
1. Réactions hydrolytiques, 113; 2. Dégradations oxydantes, 114; 3. Dégradations réductrices, 115; 4. Techniques pyrolytiques, 115.	
E. Dégradations biologiques	115
IV. Interactions avec les milieux aqueux.	116
A. Solutions et dispersions colloïdales.	116
B. Pouvoir salifiant et complexant.	117
1. Stabilité des sels et des complexes, 117; 2. Conditions de précipitation des complexes, 117.	
Conclusion	118
Bibliographie.	118
CHAPITRE VII. + Biologie des sols	123
I. Les organismes du sol.	123
A. Les microorganismes	123
1. Principaux groupes de microorganismes et leur répartition, 123; 2. Rôle et activité des microorganismes, 128; 3. Méthodes d'étude de la microflore du sol et de son activité, 129.	
B. La faune du sol.	130
1. Systématique de la faune du sol, 131; 2. Méthodes d'étude concernant les animaux du sol, 133; 3. Répartition des groupes d'animaux dans les différents types d'humus, 134; 4. Rôle de la faune dans la transformation des litières et la formation des humus, 134.	
II. Mécanismes microbiens intervenant dans l'humification.	136
A. Méthodes d'étude des mécanismes microbiens de l'humification.	136
1. Modèles complexes, 137; 2. Modèles simplifiés : incubation en cuve, 137; 3. Mesures et contrôles de l'activité microbienne au cours de l'humification, 137.	
B. Transformation et évolution des différents constituants de la matière organique fraîche	139
1. Dégradation des glucides (hydrates de carbone), 139; 2. Dégradation des acides aminés et des composés peptidiques, 140; 3. Dégradation des composés phénoliques, 140; 4. Production de substances humiques, 141.	
III. Mécanismes microbiens de l'altération des minéraux.	141
A. Méthodes d'étude de l'altération microbienne.	141
1. Modèles complexes, 141; 2. Modèles simplifiés, 142; 3. Mise en évidence de l'action des microorganismes sur les minéraux, 142.	
B. Mécanismes de solubilisation microbienne des éléments minéraux.	142
1. Acidolyse, 142; 2. Complexolyse, 143; 3. Biosynthèse de métabolites alcalins, 143; 4. Réduction microbienne directe ou indirecte de Fe et Mn, 143; 5. Influence des facteurs de l'environnement sur la solubilisation microbienne des éléments minéraux, 144; 6. Dégradation des minéraux par solubilisation microbienne d'éléments minéraux, 144.	
C. Mécanismes d'insolubilisation microbienne des éléments minéraux.	144
1. Immobilisation d'éléments minéraux par les cellules microbiennes, 144; 2. Formation de composés organo-minéraux insolubles, 145; 3. Biodégradation de complexes organo-minéraux solubles, 145; 4. Précipitations physico-chimiques d'éléments minéraux faisant suite à une mobilisation microbienne	145

D. Incidences pédogénétiques.	146
1. Incidences sur la podzolisation, 146; 2. Incidences sur la dégradation des sols engorgés	146
IV. Mécanismes biologiques de la transformation du matériel végétal. Formation des humus	146
A. Méthodes d'étude. Principaux résultats.	147
1. Étude globale de la transformation des litières, 147; 2. Étude de la répartition des microorganismes qui transforment les litières, 147; 3. Étude micromorphologique de la transformation des litières, 148; 4. Étude ultrastructurale de la transformation du matériel végétal.	148
B. Les grandes voies de formation des humus aérés.	149
C. Principaux types d'humus.	151
1. Humus peu évolués, 152; 2. Humus évolués avec humification biologique dominante : Mull, 152; 3. Humus évolués à maturation bioclimatique, 153; 4. Humus à évolution modifiée par hydromorphie : tourbes et anmoor, 153.	
Bibliographie.	153
CHAPITRE VIII. — Les solutions du sol. Composition et signification pédogénétique	161
I. Méthodologie : extraction et analyse des eaux de gravité et des eaux capillaires des sols	161
A. Méthodes de prélèvement <i>in situ</i> des eaux de gravité.	161
1. Lysimètres à tension, 161; 2. Lysimètres sans tension, 162; 3. Dispositifs à absorption physico-chimique assimilables à des lysimètres, 163.	
B. Méthodes d'extraction des eaux capillaires.	163
1. Déplacement par percolation, 163; 2. Extractions par pression (compaction) et succion, 164; 3. La centrifugation, 164.	
C. Méthodes d'analyse des solutions du sol.	164
1. Séparation et analyse des matières en suspension, 164; 2. Analyse des éléments en solution, 165.	
II. Les solutions du sol et la pédogenèse.	167
Les milieux acides	167
A. Transport et redistribution de matière par les eaux de gravité.	167
1. Les matières en suspension, 168; 2. Les éléments en suspension, 168.	
B. Formes des composés organiques.	170
1. Composés de bas poids moléculaire, 170; 2. Édifices moléculaires complexes, polycondensats ou polymères, 171.	
C. Modes de liaisons organo-minérales.	173
D. Comparaison du contenu organo-métallique des eaux de gravité et des eaux capillaires d'un podzol.	174
Les milieux carbonatés	178
A. Profils des éléments en solution dans les eaux de gravité.	178
1. Rendzine forestière, 178; 2. Rendzine agricole, 179.	
B. Solubilisation et transfert du calcium.	180
Bibliographie.	181

CHAPITRE IX. — <i>Analyse des complexes organo-minéraux des sols.</i>	187
I. Généralités : les fractions organiques du sol.	187
II. Mécanismes des interactions organo-minérales. Modes de liaisons organo-minérales.	188 188
1. Adsorption de cations organiques sur les argiles, 190; 2. Adsorption d'anions organiques et macromolécules polaires, 190; 3. Adsorption des molécules non ou peu polaires, 190.	
Conclusion	191
III. Méthodes de fractionnement des matières organiques et des complexes organo-minéraux.	192
1. Fractionnement physique, 192; 2. Extraction chimique des composés organiques et des complexes organo-minéraux, 196; 3. Matière organique non extractible ou humine, 201.	
IV. Applications	202
1. Action des constituants minéraux sur la formation du profil organique, 202; 2. Précisions apportées au concept des sols bruns ocreux par analyse des complexes organo-métalliques, 204; 3. Rôle des complexes organo-minéraux dans l'édification des structures des sols brunifiés acides, 205.	
Bibliographie.	207
CHAPITRE X. — <i>Étude du renouvellement des matières organiques des sols par les radioisotopes (¹⁴C)</i>	210
I. Applications de la méthode de datation.	210
1. Généralités : principes et technique, 210; 2. Notion de temps moyen de résidence, 212; 3. Gradient du TMR de la matière organique dans les sols, 213; 4. Le renouvellement des fractions, 215.	
II. Expérimentations avec des substrats marqués au ¹⁴ C.	219
1. Considérations générales, 219; 2. Expériences de laboratoire, 219; 3. Expériences de longue durée sur le terrain, 222.	
III. Conclusions	224
Bibliographie.	225

Deuxième partie

PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS 227

CHAPITRE XI. — <i>La granulométrie</i>	227
I. L'analyse granulométrique.	227
A. Les prétraitements, 227; B. Obtention et quantification des sables, 229; C. Dispersion. Analyse des limons et argiles, 229; D. Fractionnement des particules inférieures à 2 μ, 230.	
II. Représentation et applications.	230
A. Courbes cumulatives, 230; B. Classification des textures, 230; C. Homogénéité verticale des profils, 232.	

III. Conclusions	232
Bibliographie.	233
CHAPITRE XII. — <i>Assemblage et organisation physique des particules.</i>	234
I. Structure	234
1. Niveaux de structure, 234; 2. Facteurs de la structuration, 234; 3. Types de structure, 235; 4. Description des structures, 239.	
II. Importance de la structure; porosité.	239
III. <u>Mesure de la porosité.</u>	242
1. Porosité totale, 242; 2. Porosité texturale, 244.	
IV. La stabilité structurale.	244
1. La notion de stabilité structurale et son importance, 244; 2. Mécanismes de dégradation de la structure, 245; 3. Méthode française d'étude de la stabilité structurale, 245; 4. Influence de la matière organique sur la stabilité structurale, 248; 5. Autres facteurs de la stabilité structurale (texture, cations, faune du sol), 249; 6. Indices de stabilité et comportement au champ, 250.	
Bibliographie.	250
CHAPITRE XIII. — <i>Organisation du sol à l'échelle microscopique.</i>	251
I. Les techniques microscopiques : possibilités et limites.	251
1. La chaîne de microscopie intégrée par réflexion, 252; 2. La chaîne de microscopie intégrée par transmission, 252.	
II. La micromorphologie des sols.	255
1. La terminologie micromorphologique élémentaire, 255; 2. La terminologie micromorphologique d'ordre supérieur, 264.	
Bibliographie.	265
CHAPITRE XIV. — <u>Le sol et l'eau.</u>	266
Introduction.	266
Le sol, réservoir hydrique.	267
I. Généralités	267
II. États de l'eau	268
1. Localisation de l'eau dans la porosité et au voisinage des argiles, 268; 2. État énergétique de l'eau et ses relations avec la teneur en eau, 273.	
III. Caractérisation du réservoir.	278
1. Les paramètres de la réserve hydrique, 278; 2. Niveaux d'énergie caractéristiques, 279; 3. Profondeur d'enracinement, 284; 4. Importance de la réserve hydrique des sols, 287.	
Les transferts liquides dans le sol.	288
I. Transfert de l'eau	288
1. Généralités, 288; 2. Mobilité de l'eau des réserves du sol, 289; 3. Les flux d'eau, 290; 4. Méthodologie, 293.	

II. Transfert des solutés	293
1. Généralités, 293; 2. Phénomènes physiques de base, 293; 3. La dispersion hydrodynamique, 294; 4. Les déplacements miscibles et leur prédiction, 295; 5. Méthodologie, 295.	
III. Fonctionnement hydrique des milieux poreux.	296
1. Processus, 296; 2. Applications, 301; 3. Méthodologie, 303; 4. Quelques valeurs de la conductivité hydraulique, 304.	
Le bilan hydrique.	304
I. Généralités	304
II. Les termes du bilan hydrique.	305
1. Les entrées d'eau, 305; 2. Les sorties d'eau, 305; 3. La variation du stock d'eau du sol, 307.	
III. Les bilans généraux.	307
1. Bilan climatique, 307; 2. Bilan hydrologique, 307.	
IV. Le bilan pédoclimatique	307
V. Bilan hydrique et alimentation des plantes.	308
VI. Méthodologie.	309
1. Cases lysimétriques, 309; 2. Méthode du bilan d'énergie, 309; 3. Stations hydrologiques, 310.	
Bibliographie.	310
CHAPITRE XV. — <i>Aération et phénomènes d'oxydo-réduction dans le sol</i>	313
I. L'aération du sol	313
1. L'atmosphère des sols, 313; 2. Les gaz dissous, 314.	
II. Niveau d'oxydo-réduction du sol.	315
1. Le potentiel d'oxydo-réduction et sa mesure, 315; 2. Résultats, 316.	
III. Influence de l'aération et du niveau d'oxydo-réduction sur l'évolution des sols.	318
1. Aération du sol et activité biologique, 318; 2. État d'aération du sol, niveau d'oxydo-réduction et processus biochimiques, 319.	
IV. Influence du déficit en oxygène et de l'engorgement sur les végétaux supérieurs.	320
1. Influence sur les diverses fonctions, 321; 2. Phénomènes d'adaptation, 321.	
Bibliographie.	322
CHAPITRE XVI. — <i>La température du sol</i>	324
I. Apport de chaleur au sol. Bilan.	324
II. Température à la surface du sol. Échanges avec les couches profondes.	325
III. Effets de la température du sol et de ses variations.	327
Bibliographie.	328
CHAPITRE XVII. — <i>Notion de pédoclimat</i>	329

1. Pédoclimat et climat général.	329
2. Importance du pédoclimat.	329
3. Variations annuelles du pédoclimat.	330
4. Les grands types de pédoclimat.	332
Conclusion	332
Bibliographie.	332
CHAPITRE XVIII. — <i>Complexe absorbant. Lois générales d'échange des anions et des cations</i>	333
Introduction.	333
I. Rappels théoriques sur l'échange d'ions.	333
II. Exemples d'exploitation d'une isotherme d'échange.	336
1. Traitement thermodynamique, 336; 2. Méthode des réseaux de concentration, 337.	
III. La charge de l'échangeur.	340
1. Argiles, 340; 2. Oxydes, hydroxydes et matériaux amorphes, 341; 3. Substances organiques, 342.	
IV. Réversibilité de la réaction d'échange.	343
V. Sélectivité de l'échange.	344
VI. L'acidité d'échange.	345
VII. L'échange d'anions.	347
VIII. Quelques indications pratiques quand l'échange d'ions est en cause.	348
1. Préparation d'un matériau saturé par un ion déterminé, 348; 2. Détermination de la capacité d'échange, 349; 3. Établissement des isothermes d'échange, 350.	
Conclusion	350
Bibliographie.	352
CHAPITRE XIX. — <i>Mécanismes de régulation du pH des sols</i>	354
Introduction.	354
I. Mécanismes réglant le pH des sols acides.	354
1. Définition des paramètres mesurés, 354; 2. Relations entre le pH et le taux de saturation du sol, 355; 3. Constituants responsables du pouvoir tampon des sols acides, 356.	
II. Mécanismes réglant le pH des sols calcaires.	359
1. Les équilibres du système $\text{CaCO}_3 - \text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ des sols calcaires, 359;	
2. Relation entre le pH d'un sol calcaire et la pression partielle de CO_2 , 361;	
3. Facteurs de variation du pH des sols calcaires, 361.	
III. Mécanismes réglant le pH des sols halomorphes.	363
Bibliographie.	364

CHAPITRE XX. — <i>Les formes des éléments dans le sol et la nutrition des plantes. Généralités</i>	366
I. Bref historique	366
II. Profil racinaire et imbrications racines-sol.	367
III. Diffusion et transport des éléments minéraux vers les racines.	369
IV. Appréciation courante des réserves et des possibilités nutritives des sols.	370
Bibliographie.	371
CHAPITRE XXI. — <i>Le calcaire dans les sols. Calcium et magnésium</i>	372
I. Origine, héritage et néoformation du calcaire.	372
II. Les facteurs physiques de la division du calcaire.	373
III. L'altération des roches calcaires.	373
1. <i>La dissolution des carbonates et le transfert du calcium</i> , 373; 2. <i>La reprécipitation du carbonate de calcium</i> , 374; 3. <i>L'altération des roches calcaires</i> , 374.	
IV. Décarbonatation et évolution pédologique.	374
V. Calcium et magnésium.	375
1. <i>Origines</i> , 375; 2. <i>Quantités présentes dans le sol</i> , 375; 3. <i>Lixiviation du calcium et du magnésium</i> , 376; 4. <i>Rôle agronomique du calcium</i> , 377; 5. <i>Rôle agronomique du magnésium</i> , 378.	
Bibliographie.	378
CHAPITRE XXII. — <i>Le potassium</i>	379
I. Le potassium dans les minéraux primaires.	379
II. Libération de K au cours de la pédogenèse.	380
1. <i>Destruction des silicates</i> , 381; 2. <i>Libération du K par transformation des micas et illites</i> , 381.	
III. Refixation au niveau des minéraux secondaires.	382
IV. Cycle géochimique et bilan du K dans les sols.	383
Bibliographie.	385
CHAPITRE XXIII. — <i>L'azote</i>	386
Introduction.	386
I. Minéralisation	387
II. Immobilisation	388
III. Fixation d'azote moléculaire	388
1. <i>Fixation non symbiotique</i> , 388; 2. <i>Fixation symbiotique</i> , 389.	
IV. Les pertes par voie gazeuse.	389
V. Les pertes par drainage.	390

VI. Évolution au cours de l'année de la teneur des sols en azote minéral.	390
VII. Bilan d'azote.	391
VIII. Nutrition azotée des plantes.	392
Bibliographie.	394
CHAPITRE XXIV. — <i>Le phosphore et le soufre</i>	395
I. Le phosphore	395
1. <i>Le phosphore organique</i> , 395; 2. <i>Le phosphore minéral</i> , 397; 3. <i>Adsorption et désorption des ions PO₄ dans les sols</i> , 398; 4. <i>Phosphore assimilable des sols</i> , 399.	
II. Le soufre.	402
1. <i>Origines du soufre du sol</i> , 402; 2. <i>Nature des composés du soufre du sol : cycle du soufre</i> , 403; 3. <i>Évolution du soufre du sol</i> , 404.	
Bibliographie.	406
CHAPITRE XXV. — <i>Oligoéléments indispensables à la vie des plantes. Phénomènes de toxicité</i>	408
I. Les oligoéléments indispensables à la vie des plantes.	408
II. Phénomènes de toxicité.	412
Bibliographie.	415
CHAPITRE XXVI. — <i>Conclusion : relations entre la nutrition des plantes et les propriétés physiques</i>	416
1. Évolution de certains éléments par des voies biologiques.	416
2. Processus physico-chimiques.	417
3. Développement des systèmes racinaires.	417
4. Conséquences à l'égard de la fertilisation.	417
CHAPITRE XXVII. — <i>La cartographie des sols</i>	419
I. Introduction	419
II. Objectifs de la cartographie des sols.	420
III. Les documents cartographiques	420
IV. Réalisation des cartes de sols.	423
1. <i>Phase préparatoire et de reconnaissance</i> , 424; 2. <i>Prospection systématique. Travail de terrain</i> , 424; 3. <i>Interprétation et mise au point des données de terrain et de laboratoire</i> , 425; 4. <i>Établissement des documents cartographiques</i> , 426; 5. <i>Élaboration de la légende</i> , 430; 6. <i>Notice explicative</i> , 430.	

V. Utilisation des cartes de sols	432
1. Contributions aux choix des grandes orientations, 433; 2. Contributions aux réalisations, 433.	
VI. Conclusions	435
<i>Bibliographie.</i>	438
<i>Annexes : Méthodes pratiques d'analyse des sols</i>	440
<i>Index</i>	455

CONTENTS

Soil Constituents and Properties

A. — SOIL CONSTITUENTS

I. — Identification and quantitative evaluation of the mineral constituents. II. — Amorphous and crystalline oxyhydroxids in soils. III. — Clay minerals. IV. — Conditions of formation of secondary minerals. V. — Ecological signification of the weathering complex: Bioclimatic and local site factors. VI. — Formation and properties of the humic molecules. VII. — Soil Biology. VIII. — Soil Solutions: composition and pedological signification. IX. — Study of organo-mineral compounds of soils. X. — Study of the turnover of organic matter, through the radioisotopes.

B. — PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF SOIL

XI. — Granulometry. XII. — Soil fabric and physical aggregation of particles. XIII. — Soil organisation at microscopical scale. XIV. — Soil and water. XV. — Aeration and redox potential of soils. XVI. — Soil Temperature. XVII. — Conclusion: concepts of pedoclimate. XVIII. — Absorbing complex: Anions and cations exchange properties. XIX. — Regulation mechanisms of soil pH. XX. — Forms of the nutrients and their availability. XXI. — Limestone, calcium and magnesium in soils. XXII. — Potassium. XXIII. — Nitrogen. XXIV. — Phosphorus and sulfur. XXV. — Plant needs of micronutrients: deficiency and toxicity. XXVI. — Conclusion: Relations between plant nutrition and physical properties. XXVII. — Soil survey. *Annex.* — Practical methods of soil analysis.
