

sol:
interface
fragile

P. Stengel,
S. Gelin, coord.

MIEUX COMPRENDRE

 **INRA**
EDITIONS

sol : interface fragile

P. Stengel, S. Gelin, coord.

MIEUX COMPRENDRE

Ouvrages parus dans la même collection :

**Les marqueurs moléculaires
en génétique et biotechnologies végétales**

Dominique DE VIENNE
Coédition INRA-CNED
1998, 200 p.

**Assimilation de l'azote chez les plantes.
Aspects physiologique, biochimique et moléculaire**

Jean-François MOROT-GAUDRY
1997, 422 p.

L'eau dans l'espace rural

RIOU C., BONHOMME R., CHASSIN P.,
NEVEU A., PAPY F., éd.
1997, sous presse.

**L'eau dans l'espace rural.
Production végétale et qualité de l'eau**

C. RIOU, éd.
Coédition INRA-AUPELF-UREF
1997, 411 p.

La pomme de terre

P. ROUSSELLE, Y. ROBERT,
Y.-C. CROSNTER, éd.
1996, 620 p.

Vie microbienne du sol et production végétale

Pierre DAVET
1996, 380 p.

Nutrition des ruminants domestiques

R. JARRIGE, Y. RUCKEBUSH,
C. DEMARQUILLY, M.-H. FARCE,
M. JOURNET
1995, 921 p.

Sols caillouteux et production végétale

Raymond GRAS
1994, 178 p.

Biologie de la lactation

Jack MARTINET,
Louis-Marie HOUBEINE
1993, 587 p.

**Amélioration des espèces végétales cultivées.
Objectifs et critères de sélection**

André GALLAIS,
Hubert BANNEROT
1992, 768 p.

**La régression non linéaire :
méthodes et applications en biologie**

Sylvie HUET, Emmanuel JOLIVET,
Antoine MESSÉAN
1992, 250 p.

**L'épidémiologie en pathologie végétale :
mycoses aériennes**

Franz RAPILLY
1991, 318 p.

Cytogénétique des mammifères d'élevage

Paul C. POPESCU
1989, 114 p.

Les oligo-éléments en agriculture et élevage

Yves COÏC, Marcel COPPENET
1989, 114 p.

SOMMAIRE

v Préface

Première partie

- 1 Le sol : lieu d'échange et de transfert
-

Chapitre 1

- 3 **Constituants et organisation du sol**

3 Une fraction minérale divisée et réactive

6 Une fraction organique constamment renouvelée

10 Une architecture en perpétuelle évolution

Chapitre 2

- 19 **Réactivité du sol : propriétés chimiques**

19 Le sol, un réacteur chimique

20 La diversité des réactions chimiques

25 Les outils de l'étude de la réactivité chimique des sols

Chapitre 3

- 29 **Les transferts dans le sol**

29 Le sol, un milieu poreux perméable

30 Dans le sol (presque) tout bouge et (presque) rien ne se voit

34 Les méthodes d'analyse

37 De l'infiniment petit à l'infiniment grand

Chapitre 4

- 41 **Sol et échanges avec le couvert végétal**

41 Techniques de quantification des échanges et transferts

44 Les échanges et transferts entre sol et couvert végétal

51 Notion de fertilité des sols

51 Prévoir les possibilités de transfert depuis le sol jusqu'au couvert

53 Modifier les transferts du sol au couvert végétal :

pratique agricole et agriculture « sustainable »

57 Fragilité de l'interface sol au regard de sa fonction d'accueil
et de développement du couvert végétal

60 Conclusion

Deuxième partie

- 65 Le sol biotransformateur
-

Chapitre 5

- 67 **Les biotransformations du carbone et de l'azote**

68 Les voies de décomposition des matières organiques

71 Le cycle de l'azote

77 Les méthodes d'investigation

79 Quantification

Chapitre 6

- 83 Les micro-organismes dans la transformation des minéraux :**
incidence sur la formation, le fonctionnement
et l'évolution des sols
- 84** Dissolution et altération des minéraux
- 86** Insolubilisation, accumulation et dépôt d'éléments minéraux
- 89** Quelques exemples d'incidence sur le fonctionnement des sols

Chapitre 7

- 93 La rhizosphère**
- 94** Un environnement bien particulier
- 98** Un lieu d'intense activité microbienne
- 103** La microflore rhizosphérique influence la croissance
et l'état sanitaire de la plante-hôte
- 104** Conclusion

Troisième partie

- 107** Conséquences de l'utilisation des sols par l'homme

Chapitre 8

- 109 La salinisation des sols**
- 109** Les enjeux
- 112** Sources, mécanismes et conséquences de la salinisation
- 120** Quelques stratégies pour lutter contre la salinisation
proprement dite (excès de sels)
- 123** Conclusion

Chapitre 9

- 129 L'érosion hydrique des sols cultivés en milieu tempéré**
- 129** Les enjeux
- 131** Les principaux processus
- 135** Les unités spatiales et temporelles fonctionnelles
- 138** Les facteurs de l'érosion hydrique
- 141** Les unités spatiales et temporelles décisionnelles
et les stratégies de lutte contre l'érosion
- 142** Conclusion

Chapitre 10

- 145 Les sources de pollution des sols**
- 145** Comment des produits toxiques parviennent-ils au sol ?
- 153** Le cas des nitrates : attention aux idées fausses !
- 154** Et le fond pédo-géochimique naturel ?

Chapitre 11

- 161 Contamination des sols par les métaux lourds
et autres éléments-traces**
- 161** Introduction et définitions
- 162** Les éléments-traces dans notre environnement

- 166 Contamination des sols par les éléments-traces
- 168 Remèdes et réglementations
- 171 Conclusion

Quatrième partie

- 173 Mieux gérer les sols

Chapitre 12

- 175 **L'emploi des pesticides et des engrais en agriculture**

- 175 Les enjeux

- 176 Quelques stratégies en agriculture à haut niveau d'intrants :
l'exemple de l'Europe du Nord-Ouest

- 181 Quelques stratégies en agriculture vivrière à bas niveau d'intrants :
l'exemple de zones intertropicales humides

- 184 Conclusion

Chapitre 13

- 187 **Les fonctions épuratrices du sol et leurs limites**

- 188 Filtration et colmatage

- 190 Le sol réacteur physico-chimique

- 192 Le sol biotransformateur

- 196 Le sol stockeur des éléments fertilisants :
le recyclage par la végétation

- 197 Le sol épurateur des micro-organismes pathogènes

- 199 La pratique de la géoépuration en France

Annexe

- 203 **L'observatoire de la qualité des sols**

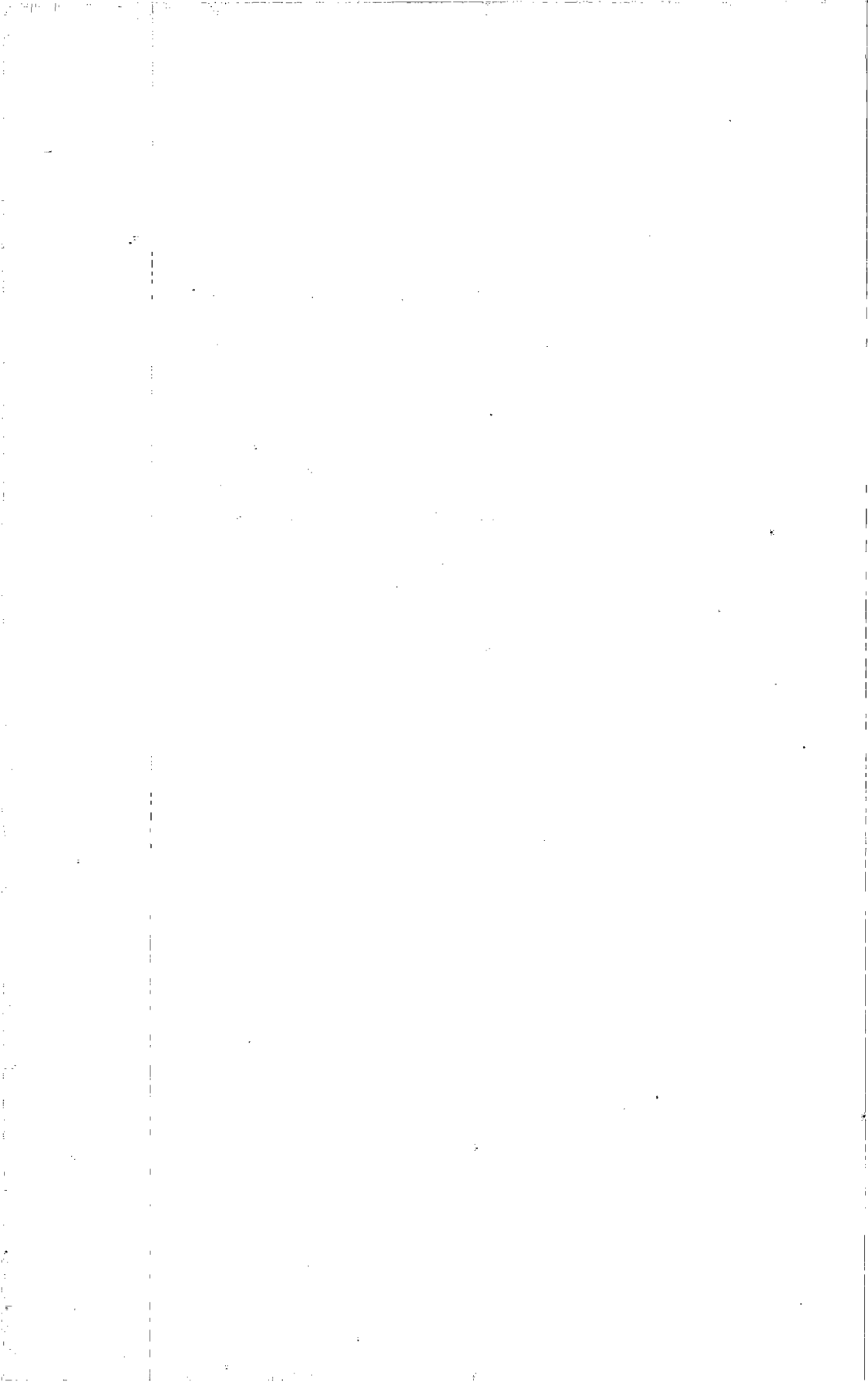
- 203 L'objectif initial

- 203 L'état actuel de l'OQS

- 204 Le futur de l'OQS

- 206 L'OQS un exemple de démarche scientifique appliquée au terrain

-
- 213 Liste des auteurs



Préface

Le Sol, auquel est consacré cet ouvrage, est celui des pédologues et des agronomes. Il s'agit de cette partie superficielle de l'écorce terrestre fortement soumise à l'action des agents climatiques et colonisée par les êtres vivants. Ceux-ci, conjointement et lentement, la transforment par un ensemble de processus où interagissent phénomènes physiques, chimiques et biologiques. La formation qui en résulte, couvre l'essentiel des surfaces continentales, et constitue la couverture pédologique. Suivant les climats locaux, les roches dont elle est issue, la végétation qui l'occupe, le régime des eaux auquel elle est soumise, le relief et, finalement, l'usage qu'en fait l'homme, elle se différencie en formant des sols. Ceux-ci peuvent être très variés dans leur composition et la différenciation des horizons qui les constituent. L'inventaire de cette diversité, sa description, l'analyse de sa genèse et du rôle des facteurs qui viennent d'être mentionnés conduisent à expliquer la distribution géographique des sols, leur localisation dans le paysage et leurs évolutions actuelles. Elles sont l'objet des recherches de la pédologie.

Cette acception du concept de sol n'est pas unique, c'est pourquoi il est nécessaire de le rappeler. Terme commun, utilisé par différentes communautés scientifiques ou professionnelles, le mot sol est polysémique. Son sens le plus courant de support qu'on parcourt et sur lequel s'appuie toute structure pesante, vivante ou inerte, est repris en droit, où sol équivaut à espace ou territoire, et en génie civil où le sol est le matériau support des ouvrages. Le jardinier et l'agriculteur réduisent souvent le sol, employé alors comme synonyme de terre, à la couche meuble superficielle, matériau que travaillent la bêche ou la charrue. Enfin, le géologue et l'hydrogéologue tendent à appliquer le nom de sol aux couches meubles superficielles notamment à toute l'épaisseur surmontant les nappes souterraines, non saturée d'eau en permanence.

Il en résulte des visions et images multiples du sol. Celle sur laquelle nous avons choisi d'insister dans cet ouvrage est très liée à la définition qui précède, même si elle ne lui est pas exclusive. Le sol y est perçu comme une interface majeure pour la planète, couverture de la lithosphère en contact avec l'atmosphère. De cette position résultent tout particulièrement ses relations avec l'eau des précipitations qu'il intercepte, et aussi avec les eaux profondes qui s'alimentent à travers lui par drainage. Capacité d'infiltration et de rétention de l'eau font du sol un milieu favorable à la vie et une composante essentielle de la biosphère terrestre, milieu et habitat pour la part la plus importante de la biomasse continentale. Interface, le sol est donc aussi un système écologique dont la complexité se manifeste par la considérable diversité des organismes qui le peuplent. C'est d'ailleurs de cette relation avec la biosphère qu'il est sans doute le plus pertinent de dériver un complément à la définition du sol, concernant sa limite en profondeur. Malgré

l'imprécision que cela recouvre, on peut la référer à l'extension verticale des systèmes racinaires des végétaux, qui pour les cas les plus fréquents, et pour l'essentiel de leur masse, se situe entre 1 et 2 m, en l'absence d'obstacle impénétrable.

Interface physique et système écologique, il convient de compléter ces deux aspects essentiels du sol par la prise en compte de ses usages par l'homme, qui le place également en limite de l'anthroposphère. Celui de support trophique pour la production agricole est évidemment le premier qui soit associé à l'évocation du sol. Il a été jusqu'à une période récente la motivation très prépondérante de l'intérêt social qui lui est porté et de son étude scientifique. Cette préoccupation persiste fortement aujourd'hui en raison des menaces qui persistent sur la sécurité alimentaire du futur, conséquence de la croissance rapide de la population mondiale, en raison également des implications éventuelles de pollution des sols sur la qualité des aliments.

Mais l'inquiétude pour l'évolution de notre environnement a très largement diversifié les raisons de se préoccuper du sol et de la diversité de ses fonctions et usages environnementaux. Interface, le sol est également un carrefour des échanges entre l'atmosphère, la lithosphère, la biosphère et l'hydrosphère terrestre. Il intervient dans la régulation des flux d'eau. Il est le lieu d'échange et de transformations biogéochimiques intenses. Ceux-ci permettent à la fois de fournir en éléments minéraux la matière vivante, d'accumuler ou d'épurer des substances contaminantes pour l'eau et l'atmosphère, de recycler les substances organiques et les déchets produits par la vie et les activités humaines.

A ces divers titres, le sol apparaît de plus en plus clairement comme une ressource vitale pour l'espèce humaine et le fonctionnement des écosystèmes. Simultanément, il se manifeste une conscience plus nette de l'existence de menaces pour la pérennité à long terme de cette ressource. Celles-ci résultent de processus multiples. Dans notre pays, ceux qui paraissent les plus préoccupants sont les pollutions chimiques, par des éléments traces toxiques ou des micropolluants organiques, l'acidification des sols forestiers, l'érosion et les dégradations physiques, la baisse des teneurs en matières organiques. Au niveau planétaire, érosion et salinisation, cette dernière souvent conséquence de l'irrigation avec des eaux de mauvaises qualités, acidification, affectent des surfaces considérables. Bien qu'il soit impossible actuellement d'établir un bilan précis, les ordres de grandeurs le plus souvent cités sont de quelques dizaines de millions d'ha de sol perdues par année pour une disponibilité mondiale de 3 milliards d'ha de sols cultivables. Enfin, l'hypothèse d'existence de dégradations des qualités biologiques du sol, par diminution de l'activité et de la diversité des organismes qui l'habitent, se nourrit d'indices de plus en plus nombreux. Elle reste cependant très difficile à caractériser et quantifier.

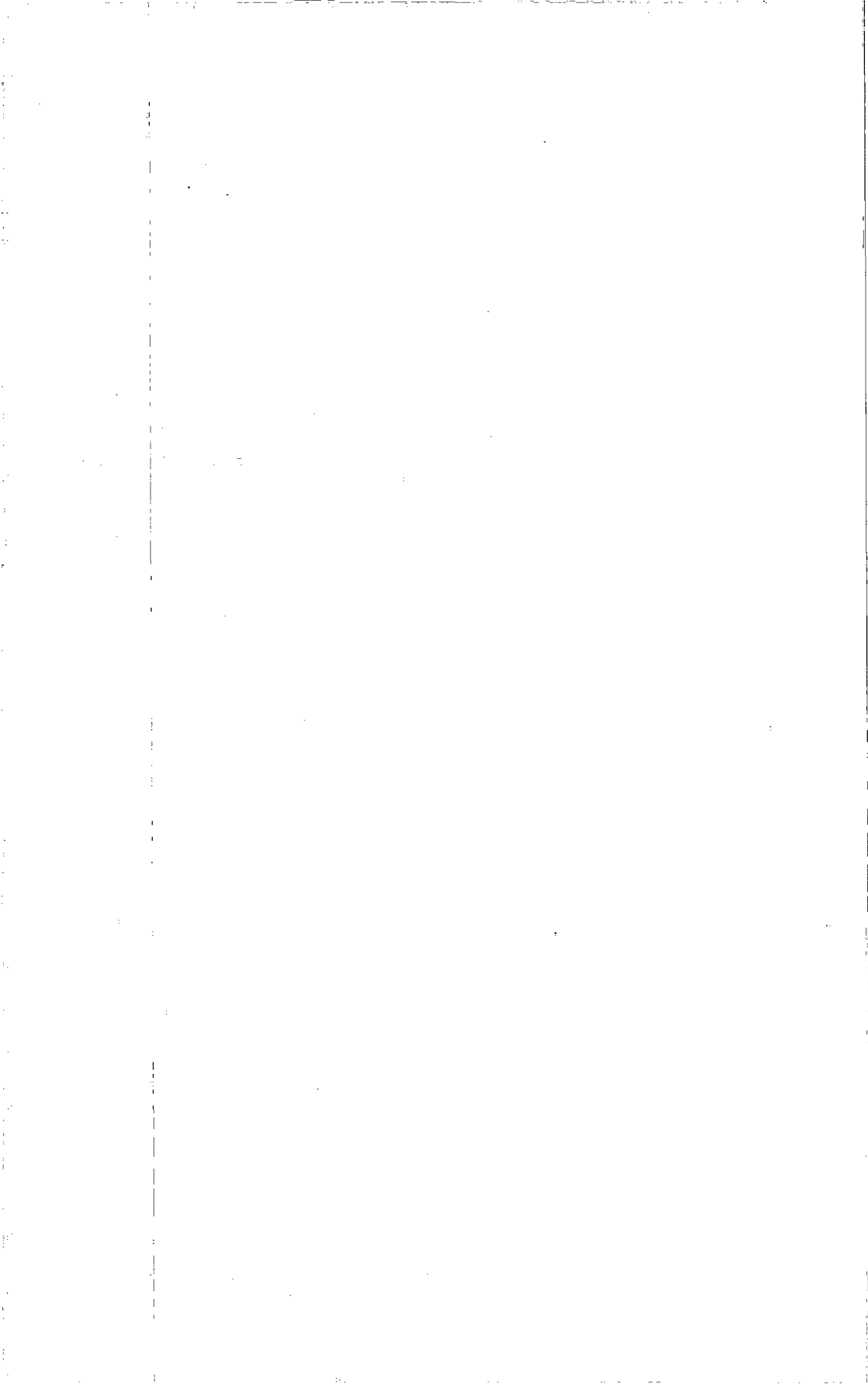
Or la plupart de ces altérations du sol et de sa qualité ne sont que lentement réversibles. La formation du sol est elle-même un processus dont la durée caractéristique est le millénaire. Il convient donc de le considérer comme une ressource pratiquement non renouvelable. Dès lors s'impose à son sujet la notion de gestion durable d'un patrimoine.

Ainsi l'interface est vitale, fragile et de surcroît non renouvelable. Pourtant, l'humanité qui avait pendant des siècles associé sa prospérité à la fertilité de la

terre, l'a largement négligée depuis quelques décennies. L'eau et l'air ont bénéficié d'une attention beaucoup plus forte. Ceci a été particulièrement net dans notre pays. La prise de conscience récente des limites des capacités épuratrices des sols, à laquelle ont contribué les pollutions nitriques et phosphatées et la présence de plus en plus fréquente de pesticides dans les eaux, nous a incité à corriger cette négligence. Cette évolution est renforcée par la perception des risques associés à l'épandage de résidus urbains et du rôle possible des dégradations physiques des sols dans la genèse de crues catastrophiques.

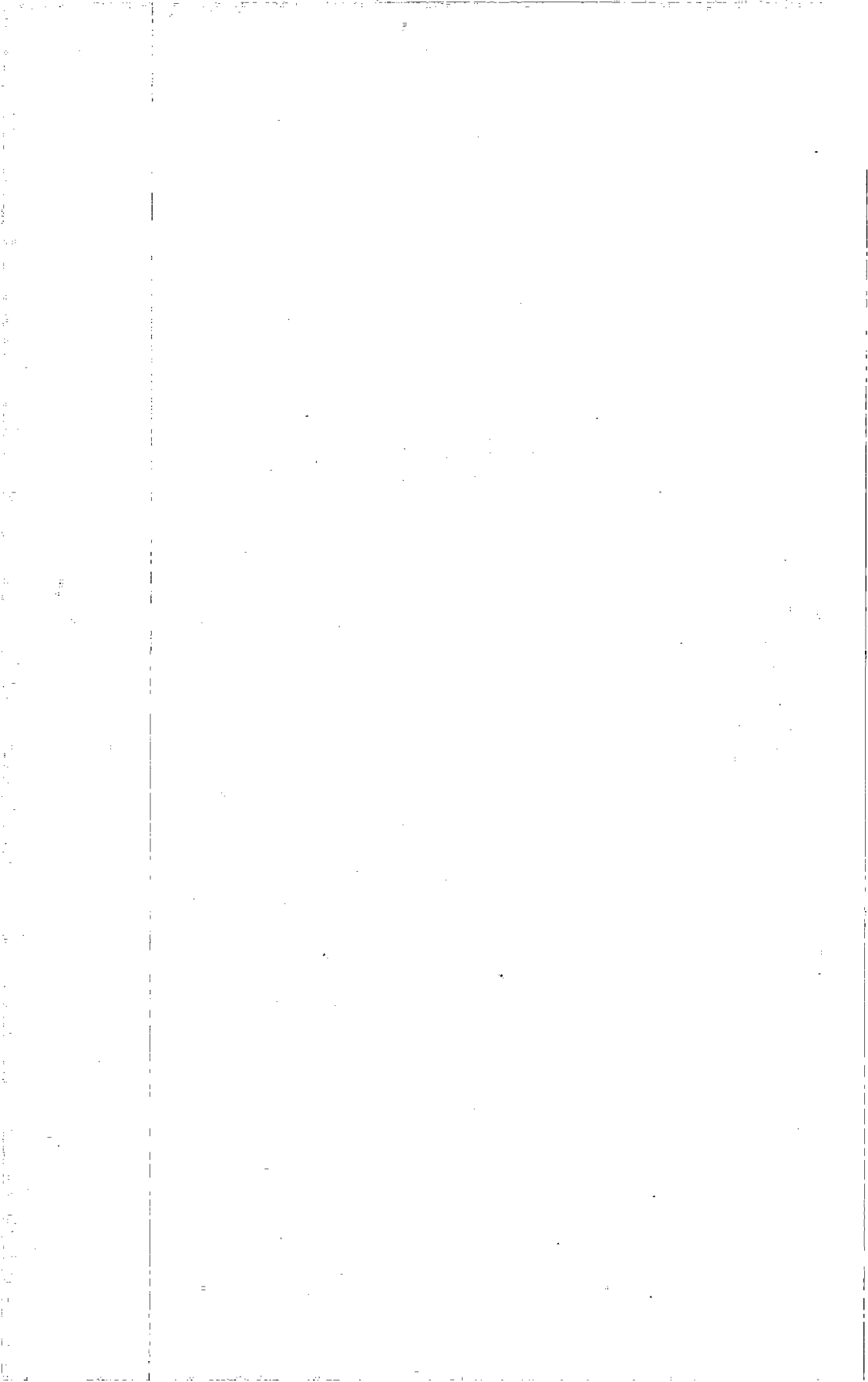
Un élément indispensable pour assurer et amplifier ce mouvement est la capacité de communiquer à la fois l'intérêt et la préoccupation pour le sol par la formation des étudiants et élèves de notre système éducatif. Montrer le sol, dans sa fascinante complexité vivante, l'associer à l'histoire de la planète et de l'humanité, sont des nécessités pour surmonter son image triviale de boue collante ou de lieu d'enfouissement. Les auteurs ont souhaité y contribuer pour qu'il reprenne sa place parmi les enjeux de l'avenir et que le souci de sa protection et réhabilitation soit mieux partagé.

Pierre STENGEL
INRA, Directeur Scientifique Adjoint
Environnement, Forêt et Agriculture



PREMIÈRE PARTIE

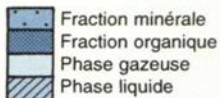
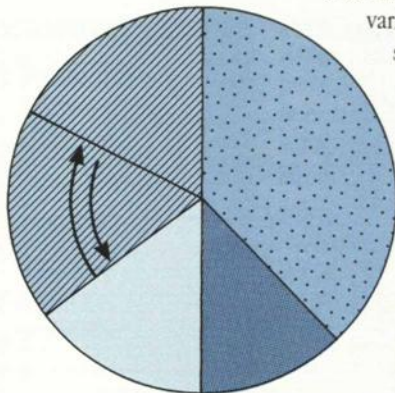
Le sol : lieu d'échange et de transfert



Constituants et organisation du sol

C. Chenu, A. Bruand

Figure 1
Les proportions relatives, en volume, des constituants solides minéraux, organiques, et des phases liquides et gazeuses dans un sol.



Le sol est la couche superficielle, meuble, de l'écorce terrestre, dans laquelle se développent les racines des plantes. C'est un *milieu triphasique* : il est constitué d'une phase solide dont l'arrangement ménage des pores. Ces pores sont remplis par une phase liquide, la solution du sol, constituée d'eau et de substances dissoutes, et par une phase gazeuse, mélange d'azote, d'oxygène, de dioxyde de carbone et de vapeur d'eau (fig. 1). Les proportions de ces différentes phases varient, selon le type de sol bien entendu, mais aussi au cours du temps selon les épisodes climatiques.

Le sol est aussi un *milieu divisé*. La phase solide est constituée de grains minéraux, de taille variable, et d'une fraction organique minoritaire. Ces constituants ne sont pas disposés au hasard : à différentes échelles allant de celle de l'arrangement des particules solides, à celle d'une coupe de sol ou du paysage, on peut reconnaître des unités morphologiques : le sol est un *milieu organisé*.

■ Une fraction minérale divisée et réactive

La fraction minérale du sol provient de la désagrégation et de l'altération des roches sous jacentes : elle consiste en des fragments de roches et des grains minéraux de taille et de nature variées. On sépare couramment les constituants minéraux du sol selon leur taille, c'est l'*analyse granulométrique* du sol. On distingue ainsi des sables, entre 2 mm et 0.05 mm (50 μm), des limons entre 50 et 2 μm et des argiles de taille inférieure à 2 μm ; leur proportion relative définit la *texture* du sol.

La fraction grossière du sol, de la taille des sables et limons est appelée le squelette du sol. Le squelette comprend surtout des minéraux hérités : quartz, feldspaths, carbonates... C'est une fraction qui est chimiquement assez inerte, car ces grains portent peu de charges électriques et leur surface spécifique (surface développée par unité de masse) est faible. Ce sont les constituants minéraux les plus petits, les argiles et les oxyhydroxydes de fer et l'aluminium, qui ont la plus grande réactivité chimique, du fait des surfaces qu'ils développent et de leurs charges.

Les argiles

Le terme d'argile correspond à deux définitions. Au sens agronomique, l'argile est la fraction minérale du sol dont les particules ont une taille $< 2\mu\text{m}$, c'est donc une fraction hétérogène du point de vue de sa nature. Au sens minéralogique, les argiles sont des phyllosilicates dont l'unité de base est un *feuillelet* de structure bien définie. Les feuillettes sont des superpositions de couches de tétraèdres de silicium (Te) ou d'octaèdres d'aluminium (Oc). Le feuillet est construit à partir de deux couches Te-Oc ou de trois couches Te-Oc-Te (fig. 2). Une partie des cations de cette structure peut être substituée par des cations de taille voisine, mais de charge inférieure ; par exemple substitution dans la couche tétraédrique de Si^{4+} par des Al^{3+} . Ces substitutions ont pour conséquence majeure un déficit de charges positives qui confère à l'ensemble du feuillet une charge négative. Celle-ci peut atteindre une milli-mole de charges négatives par gramme d'argile (ou milli-équivalent par gramme) (Tabl. 1). Cette charge négative est compensée par des cations qui sont placés sur les faces externes des feuillettes et qui peuvent s'échanger avec des cations disponibles dans le milieu extérieur : ce sont les *cations échangeables*.

Tableau 1

Les principales argiles des sols. On définit les différentes argiles selon le type de feuillet empilement de couches tétraédriques (Te), octaédrique (Oc), et selon la nature et la fréquence des substitutions de cations dans les feuillettes.

PRINCIPALES ARGILES DES SOLS									
TYPE D'EMPILEMENT	ÉPAISSEUR DES FEUILLETS	SUBSTITUTION DANS LA COUCHE TÉTRAÉDRIQUE ET VALEUR DE LA SUBSTITUTION		SUBSTITUTIONS DANS LA COUCHE OCTAÉDRIQUE	NOM DU MINÉRAL	CATIONS INTER-FOLIAIRES	CEC MILLI-ÉQUIVALENTS PAR GRAMME	EAU INTER-FOLIAIRE	DISTANCE INTER-FOLIAIRE
Te/Oc	7 Å	non	-	non	kaolinite	non	< 0,1	non	7 Å
Te/Oc/Te	10 Å	non	-	oui	montmorillonite	oui, divers	1-1,2	oui	variable
		Al^{3+}	0,5	non	beidellite	oui, divers	1-1,2	oui	variable
		Al^{3+}	$0 < x < 1$	oui	illite	K^+	0,2-0,3	non	10 Å
		Al^{3+}	1	oui	vermiculite	divers	1-1,5	oui	variable
		Al^{3+}	> 1	oui	chlorite	Mg^{2+} , Al^{3+}	0,1-0,15	non	14 Å

Dans un sol, les feuillettes d'argile ne sont pas isolés mais forment toujours des édifices complexes. Les feuillettes sont empilés parallèlement et séparés par des intervalles, les *espaces interfoliaires*. L'empilement peut être jointif, dans le cas de feuillettes neutres, ou lorsque les feuillettes présentent une charge, cet espace est occupé par des cations secs ou hydratés et par de l'eau. Comme pour les protéines on peut définir des niveaux d'organisation emboîtés : le feuillet et son espace interfoliaire associé représentent l'unité de base : la structure primaire. Les empilements ordonnés de feuillettes représentent un second niveau de structure et les particules, entités que l'on peut isoler, un troisième niveau (fig. 2). Enfin, dans les sols, ces particules forment des assemblages tridimensionnels qui vont dépendre des conditions d'hydratation, des contraintes mécaniques et de la nature et concentration des sels dans la solution du sol.

NIVEAUX D'ORGANISATION D'UNE ARGILE

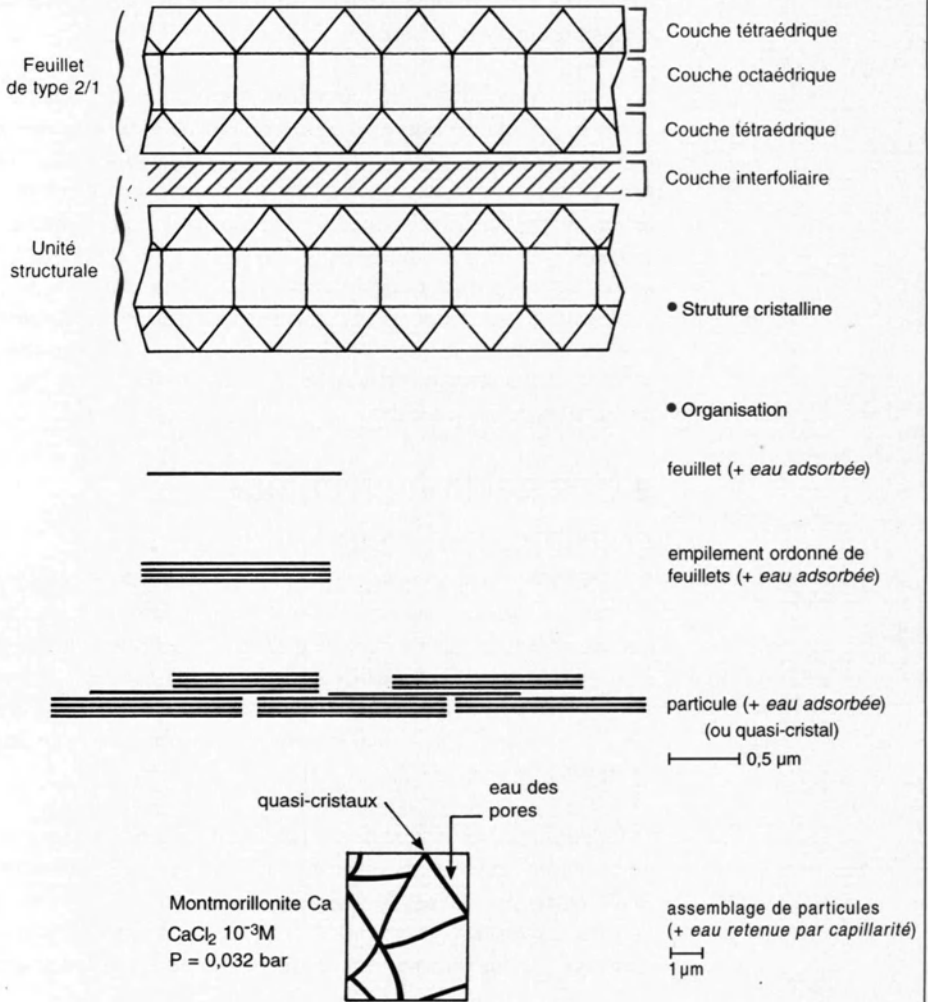


Figure 2
Les différents niveaux d'organisation d'une argile : exemple de la montmorillonite (d'après Tessier, 1986). Le feuillet est le premier niveau d'organisation. Le second niveau d'organisation correspond à l'empilement ordonné de feuillets, le troisième correspond aux particules ou quasicristaux et le quatrième correspond à l'assemblage tridimensionnel de ces particules.

La petite taille des particules d'argiles leur confèrent des propriétés colloïdales, qui sont reconnues depuis la première moitié du vingtième siècle : les particules d'argile peuvent exister à l'état dispersé ou à l'état floculé, selon la nature et la concentration des cations présents dans le milieu. Cette petite taille et la forme en feuillets font que les argiles développent une très grande surface spécifique : de plusieurs mètres à centaines de mètres carrés par gramme ! Leur charge en fait de véritables rétenteurs et échangeurs d'ions et d'eau. Des molécules d'eau sont en effet fortement retenues à la surface des argiles par adsorption et de plus, de l'eau est retenue par capillarité dans les pores définis par l'assemblage des particules (fig. 2). C'est cette eau qui est facilement disponible pour les plantes et les micro-organismes.

Toutes ces propriétés font des argiles les constituants minéraux les plus réactifs des sols, contribuant largement aux propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Ce sont aussi des constituants particulièrement sensibles aux varia-

tions des conditions physico-chimiques et physiques externes résultant d'épisodes climatiques, d'interventions culturales telles que irrigation, drainage, fertilisation, compaction, ou de pollutions.

Les minéraux argileux ont fait l'objet de nombreuses recherches depuis plusieurs décennies, eu égard à leurs applications industrielles variées : céramiques, constructions, fluidifiants, catalyseurs... L'analyse de leur structure cristalline et de leurs propriétés de surface a fait l'objet de l'essentiel des recherches jusqu'aux années 80. L'organisation des argiles, en relation avec leurs propriétés physiques, a pu être analysée grâce au développement de méthodes d'étude assurant la préservation des organisations qui existent à l'état hydraté. Alors que les recherches sur les argiles ont longtemps été focalisées sur des argiles de gisements, on s'efforce maintenant de mieux définir celles des sols. Ces dernières sont plus complexes, car ce sont souvent des mélanges de différentes espèces minéralogiques au sein d'une même particule.

■ Une fraction organique constamment renouvelée

À la mort des végétaux et des organismes qui vivent dans les sols, leurs résidus s'accumulent dans les sols et y subissent des transformations physiques, chimiques et surtout biologiques : ils sont biodégradés. Les organismes vivants du sol et les résidus organiques à différents stades de leur évolution, débris végétaux grossiers, macromolécules ou molécules simples, constituent la *matière organique* des sols. C'est donc une fraction en perpétuel renouvellement par apports et par biodégradation.

La fraction organique représente en moyenne 5% en poids et 12 % en volume du sol total avec des variations importantes selon le type de sol, selon l'écosystème (forêt, prairie, sol cultivé), et également selon le mode de gestion du sol par l'homme (exportations, travail du sol...). La teneur en matière organique des sols n'est donc pas une constante et peut varier largement en quelques années.

LES ETRES VIVANTS DANS LES SOLS		
	NOMBRE (/G SOL)	BIOMASSE (KG/HA)
bactéries	10^6-10^{10}	300-3 000
actinomycètes	10^5-10^7	50-500
champignons	10^4-10^6	500-5 000 (180mg)
protozoaires	10^4-10^5	7-200
algues	10^3-10^5	50-200
faune	10^3-10^4	500-2 000 (vers de terre)
La microflore peut représenter une à quelques tonnes de matière sèche par ha de terrain		

Tableau 2
Type et abondance
des organismes vivants
dans le sol.

Les organismes vivants

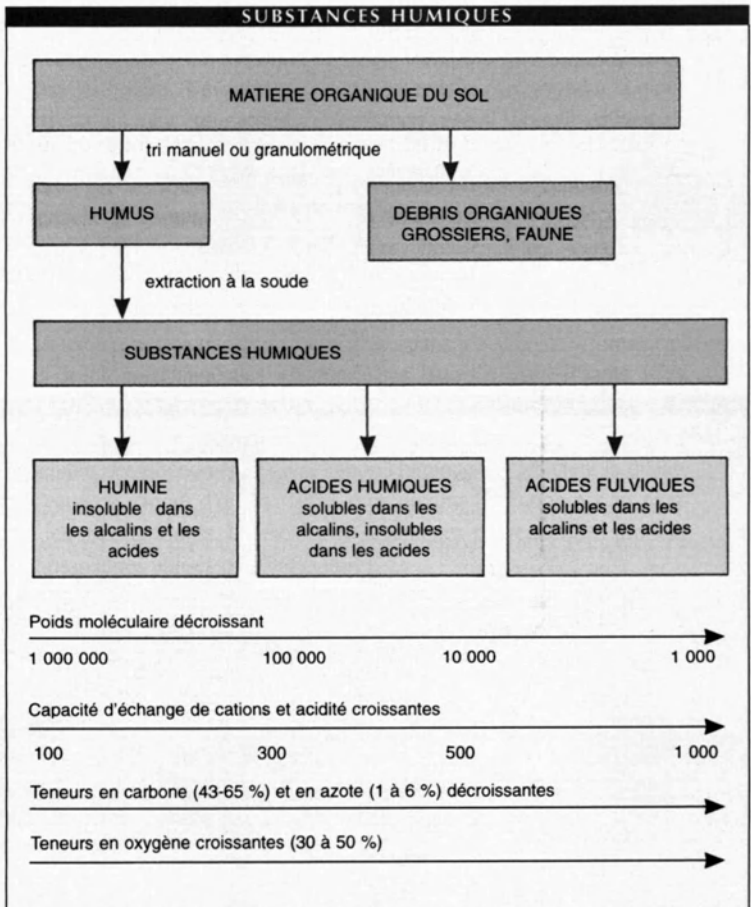
Le sol héberge une variété surprenante d'êtres vivants : des vers de terre, nématodes, insectes, acariens, protozoaires, des micro-organismes et bien sûr les racines des végétaux. Les micro-organismes se chiffrent par millions voire milliards par gramme de sol mais ne représentent que quelques pour cent de la fraction organique des sols. Cette microflore est d'une extrême diversité taxonomique ; elle est constituée de bactéries, de champignons, d'actinomycètes et d'algues, et l'on estime le nombre d'espèces différentes de micro-organismes dans un sol donné à quelques milliers (Tabl. 2). La microflore du sol recouvre aussi une grande diversité physiologique et écologique. Ainsi coexistent dans un sol des micro-organismes hétérotrophes et autotrophes, aérobies et anaérobies. A ce titre, le sol a souvent été considéré comme un réservoir inépuisable d'espèces différentes de micro-organismes. On s'aperçoit toutefois maintenant que ce réservoir de biodiversité peut être affecté par des pollutions organiques ou métalliques des sols.

L'humus

Le terme d'*humus* correspond à la matière organique du sol décomposée, c'est-à-dire celle que l'on ne peut pas identifier à l'oeil par sa forme. Cela recouvre à la fois des biomolécules héritées du vivant dont on peut définir la nature chimique, telles que des polysaccharides, des protéines ou des lignines, et des *composés humiques*, substances colloïdales et chimiquement complexes.

Les scientifiques ont été dès le 19^{ème} siècle interpellés par la présence dans le sol de composés colorés, solubles en milieu alcalin, qui pouvaient représenter plus de la moitié des matières organiques du sol. Les acides humiques, fulviques et l'humine sont des fractions définies par leur procédé d'extraction (fig. 3). Cette définition, opérationnelle, est toujours utilisée, mais les recherches de ces trente dernières années ont montré que ces fractions ne correspondent pas à des familles chimiques définies, ni à des fractions de devenir ou de fonctions différentes dans le sol. Les approches « classiques » de fractionnement chimique par les acides et les bases font donc progressivement place à des méthodes physiques permettant l'analyse directe des composés humiques sans extraction préalable. Parallèlement, des méthodes de fractionnement des matières organiques selon leur taille ou leur densité connaissent un grand essor, car elles semblent séparer des fractions qui, si elles ne sont pas chimiquement homogènes, ont un sens fonctionnel.

Figure 3
Définition et propriétés des substances humiques.



Que sont plus précisément les substances humiques ? Ce sont des macromolécules de poids moléculaire élevé, peu solubles dans l'eau, tensioactives. Elles portent une grande variété de groupements fonctionnels : carboxyles, hydroxyles, phénols, qui leur confèrent une charge globale anionique très élevée : de 1 à 5 milli-moles de charges négatives par gramme. Elles ont donc une capacité d'échange de cations supérieure à celle des argiles, et peuvent complexer des métaux. Ce sont donc des molécules très réactives chimiquement qui interagissent dans le sol aussi bien avec des éléments nutritifs, avec les surfaces des minéraux, qu'avec des polluants organiques ou métalliques, d'où l'intérêt persistant de la communauté scientifique à leur égard.

La structure des substances humiques est encore mal établie, mais des progrès importants ont été réalisés grâce à des méthodes telles que la RMN du solide ou la pyrolyse couplée à la spectrométrie de masse. Le résultat essentiel est sans doute qu'il n'existe pas deux molécules humiques identiques. Contrairement aux molécules biologiques, les substances humiques ne sont donc pas la répétition d'une séquence définie, mais elles sont construites à partir de briques élémentaires : unités aromatiques plus ou moins complexes, sucres, acides aminés, chaînes hydrocarbonées qui sont assemblées de manière aléatoire. L'ensemble forme un polymère ramifié, arrangé en pelote désordonnée, plus ou moins repliée selon les conditions physico-chimiques, dont un exemple schématique est donné dans la figure 4.

Figure 4
Structure et conformation
schématique des substances
humiques
(d'après Oades, 1989).

Traditionnellement, l'humus était considéré comme le facteur essentiel de la fertilité des sols. Ce n'est qu'à la fin du 19^{ème} siècle que Liebig montra que les végétaux ne se nourrissent pas directement à partir des matières organiques, mais à partir d'éléments minéraux. L'humus contribue à la fertilité chimique des sols en fournissant des éléments minéraux lors de sa biodégradation et en retenant des cations sur ses charges négatives. Il participe aussi largement aux qualités physiques des sols par ses propriétés spécifiques, notamment de rétention d'eau, et par la formation d'associations organo-minérales.

