

*que
sais-je?*

LA
PÉDOLOGIE

**PAR GEORGES AUBERT
ET JEAN BOULAINÉ**



**PRESSES UNIVERSITAIRES
DE FRANCE**

LA PÉDOLOGIE

DES MÊMES AUTEURS

G. AUBERT, *Les sols de la France d'outre-mer*, Paris, Imprimerie Nationale, 1941, 90 p., 16 pl. h. t.

J. BOULAINÉ, *Les sols des plaines du Chélif*, Alger, S.C.H.-S.E.S., 1957.

« QUE SAIS-JE ? »

LE POINT DES CONNAISSANCES ACTUELLES

N° 352

LA PÉDOLOGIE

par

Georges AUBERT

Chef de la section de Pédologie de l'O. R. S. T. O. M.

*Membre de l'Académie d'Agriculture
et de l'Académie des Sciences d'Outre-Mer*

et

Jean BOULAINÉ

Professeur de Géologie-Pédologie à l'E. N. S. A. de Grignon

Membre correspondant de l'Académie d'Agriculture



PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE

108, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, PARIS

DÉPOT LÉGAL

1^{re} édition 1^{er} trimestre 1967

TOUS DROITS

**de traduction, de reproduction et d'adaptation
réservés pour tous pays**

© 1967, *Presses Universitaires de France*

INTRODUCTION

La pédologie étudie les caractères, l'évolution et la répartition des sols. Pour le pédologue, le sol est un corps organisé, qui est à la fois le résultat et le siège de processus complexes. C'est une formation naturelle, parfois transformée par l'homme, mais qui peut et doit être l'objet d'une étude globale. En étudiant à la fois la morphologie et la genèse des sols, les pédologues français essaient d'en donner une définition, d'en préciser les limites, et d'en prévoir les réactions.

En 1949, les Presses Universitaires de France accueillaient dans leur collection « Que sais-je ? », la pédologie, science jeune et encore peu connue dans notre pays. Albert Demolon, qui a tant fait pour son développement et son expansion dans les milieux agricoles et scientifiques, rédigeait ce petit livre, si clair et qui eut tant de succès sous le titre *La génétique des sols*. Depuis des années cet ouvrage est épuisé ; depuis dix ans maintenant Albert Demolon est mort. C'est à deux disciples du grand agronome disparu, dont l'un s'honore d'avoir été formé par lui, que les Presses Universitaires de France ont confié la tâche de faire reparaitre son ouvrage. Conscients de la difficulté de cette tâche, nous avons préféré réécrire entièrement ce livre sous le titre *La pédologie* tout en cherchant à en maintenir l'esprit.

Depuis 1949 d'innombrables travaux ont été réalisés qui ont entraîné des progrès sensibles dans la connaissance des sols et dans la mise au point des techniques d'utilisation. Beaucoup de ces travaux ont été exécutés par des pédologues français en France et hors de France et plus particulièrement en Afrique. Depuis cette date, quatre congrès internationaux et divers colloques et conférences de Science du Sol ont fait une part importante aux problèmes de pédogenèse, de classification et de cartographie des sols.

Depuis également, sur le plan français, la prospection et la cartographie des sols ont pris une extension considérable, dans le cadre de l'I.N.R.A. (1), de l'O.R.S.T.O.M., des Enseignements supérieurs agronomiques, du C.N.R.S., ou dans celui de bureaux d'étude. Pour ces diverses raisons nous ne pouvions pas maintenir intégralement le plan de l'ouvrage d'Albert Demolon. Nous avons donc gardé la partie essentielle, qui traite de la pédogenèse et de la classification des sols, insistant davantage sur ce dernier point. Par contre, nous avons supprimé tout ce qui se rapportait à la géographie des sols pour développer davantage le chapitre sur les applications de la pédologie, l'envisageant, soit dans ses liaisons avec d'autres sciences soit comme base du développement agricole des régions et des pays, problème dont aucun homme ne peut se désintéresser.

Notre ambition reste de n'avoir pas trahi la pensée de celui dont nous ne sommes que les disciples, Albert Demolon.

- (1) I.N.R.A. : Institut National de la Recherche Agronomique.
O.R.S.T.O.M. : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer.
C.N.R.S. : Centre National de la Recherche Scientifique.

PREMIÈRE PARTIE

GÉNÉRALITÉS

CHAPITRE PREMIER

LA NOTION DE SOL

I. — Historique

La notion de sol est fort ancienne. Dans la Bible, la fille de Caleb, compagnon de Josué dans l'exploration de la Terre promise, discute avec son père des terrains qui constituent sa dot avec une réelle compétence.

Les Romains pensaient déjà qu'un sol est d'autant plus riche qu'il est plus noir et que cette couleur est due à une substance, l'humus. Jusqu'au début du XIX^e siècle l'humus fut considéré comme l'unique aliment des plantes. Cependant Bernard Palissy, note, au XVI^e siècle, l'importance des « sels » du sol.

Van Helmond, savant hollandais, montre, au XVIII^e siècle, que le CO₂ de l'air joue un rôle dans l'alimentation de la plante, et le savant suisse de Saussure étudie les rapports entre la composition chimique des plantes et celle du sol. Il observe, au début du XIX^e siècle, que le phosphate de calcium et la potasse sont des constituants minéraux constants des végétaux.

En 1840 enfin, von Liebig publie *La chimie dans ses rapports avec l'agronomie*, livre dans lequel il montre que les plantes ne se nourrissent pas d'humus, mais de solutions minérales et que l'humus est un produit transitoire entre les matières organiques végétales et les sels minéraux, seuls aliments des plantes.

Des travaux postérieurs ont précisé que l'humus contribue à l'alimentation des micro-organismes et qu'il a un rôle

important : il sert de ciment, de liant, entre les éléments minéraux du sol et contribue à la rétention de l'eau et des bases. Sa fonction chimique n'est pas négligeable. Son azote se minéralise peu à peu et contribue à l'alimentation des plantes. Enfin depuis quelques années, on sait aussi qu'il a un rôle physiologique : c'est une source de vitamines végétales et de facteurs de croissance.

Les travaux de Liebig en Allemagne, ceux de Bousingault en France et de Lawes en Angleterre furent à l'origine de l'industrie des engrais (première usine vers 1842). La fabrication de ces engrais donna lieu à des fraudes. L'opinion s'émut et un premier « laboratoire agronomique » fut créé à Nantes en 1851 pour vérifier la qualité des engrais et pour analyser les terres. Trente ans plus tard, il y avait en France près de 80 de ces laboratoires ; il en était de même dans les grands pays étrangers (Allemagne, Angleterre, Russie).

Mais le travail de ces laboratoires resta longtemps limité à ces analyses. Les chimistes ignoraient presque tout de l'effet exact des engrais et en dirigeaient mal le choix. Ce n'est que peu à peu et, en France, après la fondation de l'Institut national de la Recherche agronomique, au lendemain de la première guerre mondiale, que des recherches fondamentales furent entreprises sur les phénomènes physiques et biologiques qui se produisent dans le sol et sur les applications possibles des connaissances acquises.

La Science du Sol est donc restée longtemps dominée, chez nous comme en Europe occidentale, par le souci de l'amélioration des techniques agricoles. On utilisait pour cela les méthodes et les techniques de sciences variées : Physique, Chimie, Microbiologie, etc.

Il n'en fut pas exactement de même dans certains pays étrangers, plus vastes, moins peuplés, dans lesquels il était utile de définir les sols et d'en connaître la répartition. Une tentative originale dans laquelle sont en germe presque toutes les notions de la pédologie actuelle fut faite en Pologne vers 1765 par un Français, M. de Rieule.

Mais il fallut attendre la fin du XIX^e siècle pour que le sol devienne l'objet d'une science spéciale.

En 1877, une sécheresse catastrophique sévit en Ukraine ; une société savante russe s'en émut et finança une expédition scientifique pour étudier sur place les effets du phénomène et les remèdes à y apporter. L'une des deux commissions était dirigée par le géologue Dokouchaev ; il eut ainsi l'occasion d'étudier les sols et de créer une science nouvelle : la pédologie.

II. — Les travaux de Dokouchaev

Sur des tranchées il observe de nombreuses coupes de sol qu'il appelle des « profils ». En Ukraine le profil est presque toujours le suivant sur environ un mètre d'épaisseur :

- A. En surface une couche, ou « horizon », bien aérée, presque noire, riche en humus, grenue, où les racines des graminées se développent bien.
- B. En dessous une couche moins riche en humus, plus claire, avec des taches sombres (remplissage des tunnels d'animaux fouisseurs) par la terre de surface ou très claires (dépôts de calcaire).
- C. Enfin la roche, dans ce cas un lèss, à partir de laquelle s'est formé le sol ou roche-mère.

Ce sol est appelé par les paysans ukrainiens « chernozem », nom vernaculaire passé dans le langage scientifique. En comparant ses profils, Dokouchaev arrive à une première conclusion fondamentale : dans cette région la nature du sol est pratiquement indépendante de la roche-mère et sa formation est due à la végétation, elle-même liée au climat. Quelques années plus tard, le gouverneur de la région de Gorki, située à l'est de Moscou, soucieux de répartir équitablement les impôts fonciers, fit appel à Dokouchaev pour établir une carte des qualités des terrains. Dokouchaev examina de nouveau les profils et constata qu'ils étaient très différents de ceux de l'Ukraine formés sous un climat plus méridional.

Le sol de la région, appelé « podzol » par les paysans, comportait les horizons suivants :

- A₀, En surface, une litière de feuilles et brindilles mal décomposées ;
- A₁, Un horizon riche en humus, acide, et de couleur noire ;
- A₂, Un horizon sableux, à structure cendreuse, très clair ;
- B, Un horizon riche en argile, en humus et en fer ;
- C, Enfin la roche-mère, qui peut être la même que sous un chernozem.

La comparaison du chernozem des steppes et du podzol de la zone forestière, plus humide et plus froide, permet une deuxième conclusion fondamentale : le sol est fonction du climat.

III. — Développement récent des travaux pédologiques

Les travaux de Dokouchaev eurent un très grand retentissement ; ses nombreux élèves et disciples continuèrent son œuvre : Sibirtzev, Prassolov, etc., en Russie ; Hilgard puis Marbut aux U.S.A. ; Glinka, Von Sigmond, Gedroltz, Ramann, Stebutt en Europe centrale ; Hissink, Hall aux Pays-Bas et en Grande-Bretagne.

En France, les études de sols sur le terrain avaient été largement développées dans la deuxième moitié du XIX^e siècle et au début du XX^e siècle (Rissler, Lagatu) ; des cartes régionales de sols avaient été dressées, mais il ne s'agissait que de cartes géologiques détaillées des formations superficielles.

Vers les années 1925-1930 les études pédologiques proprement dites commencent, celles de Erhart et surtout celles d'émigrés russes, tels que Agafonoff qui établit la première carte des sols de France (1934). Elles reçoivent alors l'impulsion de A. Demolon, inspecteur général des Recherches agronomiques. Elles ne se développent cependant qu'assez lentement, mais durant ces dernières années des sections de cartographie et d'étude des sols sur le terrain ont pris naissance dans certains centres de Recherches agronomiques, et d'Enseignement supérieur, E.N.S.A. et universités, au C.N.R.S., dans les compagnies d'aménagement du territoire et dans des bureaux d'études. Par contre, outre-mer, les études pédologiques prennent de l'extension dès 1937 en Tunisie, en Algérie, au Maroc puis à partir de 1945 dans tous les pays franco-

phones des régions tropicales, en particulier en Afrique, grâce à l'action de l'O.R.S.T.O.M.

Le développement de la pédologie dans le monde entier depuis 15 ans est remarquable ; elle est étudiée et enseignée dans tous les pays ; ses congrès internationaux rassemblent tous les 4 ans des milliers de participants ; et des cartes de sols, au moins au 1/5 000 000, existent maintenant pour tous les continents. Mais en s'étendant et en s'approfondissant elle est devenue sans cesse plus complexe, s'appuyant sur un grand nombre de sciences fondamentales, dont les plus importantes restent la géologie, la biologie, la chimie.

IV. — Définition du sol et des horizons

Chaque année, par le jeu de l'assimilation chlorophyllienne, une partie de l'énergie lumineuse reçue à la surface du globe est transformée en énergie chimique par les végétaux. Une partie de cette énergie est consommée par la vie des hétérotrophes mais une autre partie est plus lentement dissipée à la surface et dans les couches supérieures du sol ; la matière organique végétale y subit une dégradation lente en passant par une forme transitoire assez stable, l'humus. Les produits finaux sont de l'acide carbonique, de l'eau, de l'ammoniac ou des nitrates. L'énergie mise en jeu au cours de cette évolution facilite l'altération progressive des roches. Cette altération est d'autant plus rapide que la température est plus élevée. Enfin les solutions du sol et même certains constituants solides peuvent migrer sous l'action de la gravité ou du fait de l'activité des végétaux et des animaux. Le produit final de ces manifestations énergétiques est le sol :

$$\text{sol} = \text{roche-mère} + \text{énergie}$$

L'ensemble des phénomènes physiques, chimiques et biologiques qui se produisent à la surface du globe a pour résultat, parmi d'autres, un quantum d'évolution annuelle du sol.

D'année en année, sous l'action du climat, des végétaux et des animaux, sous l'effet de la percolation par l'eau de pluie et sous l'effet de la pesanteur, ce sol s'organise en couches de nature différente : les horizons. L'ensemble des horizons constitue un profil de sol. Il existe de nombreux sols différents formés d'horizons dont les caractères et la nature peuvent être très variés.

Le sol est le produit de l'altération, du remaniement et de l'organisation des couches supérieures de la croûte terrestre sous l'action de la vie, de l'atmosphère et des échanges d'énergie qui s'y manifestent.

V. — Les horizons

Les pédologues ont pris l'habitude de désigner les horizons par des lettres majuscules. Suivant les pays ces lettres peuvent désigner des horizons dont les caractères sont légèrement différents. En France, une commission nationale a récemment proposé les définitions suivantes :

**Horizon A.* — Les horizons A_{00} , A_0 et A_1 A_2 A_3 se superposent dans l'ordre indiqué quand ils sont présents simultanément dans le profil.

L'horizon A est un horizon majeur occupant la partie supérieure ou l'ensemble du profil du sol, et présentant l'un ou l'autre des caractères suivants ou les deux en même temps.

- a) Présence de matière organique ;
- b) Appauvrissement en constituants tels que argile, fer, aluminium, etc.

A_{00} , horizon de surface, formé de débris végétaux facilement identifiables (feuilles, brindilles et autres), parfois désigné par les lettres L ou O ;

A_0 , horizon constitué de débris végétaux partiellement décomposés et pratiquement non reconnaissables sur le terrain. Cet horizon peut être subdivisé en F et H. La couche H se distingue de F par l'absence complète de structure végétale.

Ces deux horizons contiennent en général plus de 30 % de matière organique totale. Ils sont mesurés de bas en haut à partir du sommet de A_1 . L'un ou l'autre de ces horizons peut manquer.

Ces horizons A_0 et A_{00} sont les produits d'accumulation au-dessus de la partie minérale du sol de débris végétaux dont la décomposition est lente et qui ne s'incorporent pas au sol proprement dit.

L'horizon A_1 comporte en général moins de 30 % de matière organique bien mélangée à la partie minérale et de couleur généralement sombre. Il peut être ou non un horizon éluvial. Parfois cet horizon est surmonté ou imprégné par une mince couche de substances solubles.

L'horizon A_2 est un horizon de couleur plus claire que l'horizon sus-jacent ; il est appauvri en fer, en argile, en aluminium avec une concentration corrélative de minéraux résistants. C'est un horizon d'éluviation par lessivage de matériaux en solution ou suspension. Les éléments se déplacent généralement à l'état dissous ou dispersé vers l'horizon B ou hors du profil.

L'horizon A_3 est un horizon de transition entre A et B mais il est plus proche de A que de B. Si l'horizon de transition ne peut être valablement attribué à l'un ou l'autre, on écrira AB.

***Horizon B.** — C'est un horizon dans lequel des substances provenant des horizons superficiels sont venues s'accumuler, ou un horizon qui est nettement différent des horizons A par sa structure, sa couleur et la nature de ses constituants. Mais il est aussi très différent de la roche-mère et les minéraux primitifs y ont été profondément altérés ou remaniés. La commission de cartographie des sols en donne la définition suivante : Horizon majeur situé au-dessous de A et caractérisé par des teneurs en argile, en fer ou en humus plus élevées qu'en A ou C.

Cet enrichissement peut être dû, soit à des transformations sur place des minéraux préexistants, soit à des apports illuviaux. On désigne cet horizon par B.

Si la variation de teneur en argile et fer est très faible et que la différenciation avec A ou C ne porte que sur la consistance, la structure ou la couleur, on désignera cet horizon par (B).

Une lettre minuscule placée après B précisera la nature de l'enrichissement ou de la différenciation.

L'horizon B est subdivisé en :

B₁, horizon de transition avec A mais plus proche de B que de A ;

B₂, horizon constituant la partie essentielle de B correspondant soit à l'accumulation principale, soit au développement maximum de la différenciation.

B₃, horizon de transition avec C, mais plus proche de B que de C. On peut affecter les horizons d'un chiffre secondaire B₂₁, B₂₂... sans autre signification que d'avoir introduit une subdivision. Lorsque deux sols sont imbriqués l'un dans l'autre, les horizons du sol le plus ancien sont désignés par des lettres affectées du signe prime : A', B', etc.

***Horizon C.** — Il correspond à une roche en voie d'altération dans laquelle les transformations sont surtout d'ordre physique ; sa définition est la suivante : Horizon minéral autre que la roche brute, placé sous B (ou sous A s'il n'y a pas de B), analogue ou différent du matériau dont dérivent A et B et relativement peu affecté par les processus pédogénétiques ayant conduit à l'individualisation des horizons A et B susjacentes et ne présentant pas leurs caractéristiques.

L'horizon R. — Il correspond à la roche non altérée située sous le profil et qui peut fort bien ne pas être la roche-mère du sol ou ne l'être que partiellement.

Sols complexes. — Il arrive que des sols se forment à partir de plusieurs couches de roches ou de sédiments et que le pédologue puisse reconnaître la trace de ces diverses couches au sens sédimentologique du terme. On les désigne alors par des chiffres romains : II, III, etc. Par convention le chiffre I est toujours omis et si un sol est présumé formé à partir d'une seule roche-mère, ce symbole n'est pas écrit.

Horizons à caractères particuliers. — Enfin dans certains horizons on peut mettre en évidence divers phénomènes qui sont notés par des lettres minuscules accolées au symbole de l'horizon. Une accumulation de calcaire est notée Ca, un horizon réduit g ou G, etc.

Si la culture a profondément modifié les horizons de surface et les a mélangés on note Ap. (A perturbé). Cet horizon est parfois appelé « agropédique ».

VI. — Les constituants du sol

Les différents horizons sont constitués d'éléments très divers qui peuvent être définis par leurs dimensions et par leur nature chimique.

Les cailloux sont des morceaux de roche dont le diamètre moyen est supérieur à 2 cm. Les graviers ont des dimensions de 2 cm à 2 mm. Les sables grossiers ont un diamètre moyen entre 2 et 0,2 mm, les sables fins entre 0,2 et 0,05 mm. Les sables très fins ont un diamètre compris entre 0,05 et 0,02. De nombreux pédologues français les rattachent maintenant aux limons. On appelle limon les particules dont le diamètre apparent est compris entre 0,02 et 0,002 mm (ou 2 microns). Enfin on appelle « argile » les particules qui, à l'analyse granulométrique, présentent des caractères tels que leur diamètre théorique est inférieur à 2 microns. Le terme argile a en réalité quatre sens différents :

- Les « argiles » sont des espèces minéralogiques cristallisées donc bien définies (exemple : kaolinite, illite, montmorillonite) ;
- L'« argile » désigne, dans les analyses granulométriques, les constituants minéraux du sol dont le diamètre apparent est inférieur à 0,002 mm ;
- Une terre est appelée « argile » ou qualifiée d'argileuse, si elle contient une forte proportion de grains inférieurs à 0,002 mm, en pratique plus de 40 % ;
- Certaines roches friables, non calcaires, constituées en majeure partie de minéraux argileux, portent le nom d'« argiles ».

Suivant la proportion des éléments fins et des éléments grossiers, le sol possède des propriétés physiques, perméabilité, cohésion, plasticité, plus

ou moins accentuées. On appelle texture du sol, l'ensemble des propriétés physiques qui résultent directement de la taille de ses constituants ; elle est en relation avec la composition granulométrique, c'est-à-dire avec le pourcentage des différents éléments que nous avons défini ci-dessus.

La nature chimique des constituants du sol leur confère aussi des propriétés très importantes.

Certains sont presque inertes et constituent le squelette minéral du sol. Dans les sols évolués ce sont des minéraux très résistants à l'altération comme le quartz et certains minéraux lourds. Les sables et les limons, mais aussi des éléments très fins, constituent ce squelette. Le calcaire, les sulfates, les oxydes de fer et de manganèse sont des constituants minéraux ; ils peuvent passer peu à peu sous forme soluble ou pseudo-soluble.

D'autres constituants du sol ont des propriétés colloïdales : les argiles et l'humus.

Les argiles au sens minéralogique du terme sont des cristaux microscopiques dont les atomes sont disposés suivant des plans. A l'intérieur d'une trame d'atomes d'oxygène dont les sphères ioniques sont volumineuses se trouvent des cations qui sont surtout le silicium et l'aluminium. Mais si le volume des trous de la trame des oxygènes le permet, certains cations comme le fer, le magnésium, le calcium, le potassium se substituent au silicium et à l'aluminium. D'autres ions peuvent compléter les couches et les relier entre elles.

Les argiles ont une capacité d'échange : les charges électriques libres peuvent être équilibrées par des ions échangeables.

Les principales argiles sont les kaolinites, à faible capacité d'échange (10-12 milliéquivalents pour 100 g de terre) et à deux couches de cations ; on les

appelle argile 1/1 ou encore « teoc » (couche tétraédrique + couche octaédrique).

Les illites et les montmorillonites sont des argiles 2/1 ou « teocte » dont la capacité d'échange est de 40 me/100 g environ pour les illites et de 120 me/100 g environ pour les montmorillonites ; ces dernières sont très gonflantes.

La matière organique est l'ensemble des produits d'origine biologique du sol. Elle subit dans le sol, en quelques années sous nos climats, une évolution chimique qui la transforme en humus. Celui-ci se minéralise ensuite lentement : 1/100 environ de sa masse se décompose chaque année en composés chimiques simples, CO_2 et NH_4 entre autres. L'humus est donc une source d'azote. Il est utile de connaître la quantité totale d'humus d'un sol et le rapport du carbone à l'azote de cet humus (C/N).

On distingue dans l'humus les fractions suivantes (P. Duchaufour) :

F_1 = *acides fulviques libres* : extraits par une solution acide (attaque directe du sol par SO_4H_2 0,5 N) ; composés très solubles, acides. Ils attaquent les colloïdes minéraux, notamment les argiles qu'ils dégradent. Ils semblent constitués d'acides organiques et de composés phénoliques. Ce seraient les premiers composés humiques formés en milieu acide par décomposition du matériel végétal, et les principaux responsables du lessivage du fer et de l'argile, et de la podzolisation.

F_2 = *acides fulviques liés aux acides humiques* : uronides et polysaccharides en chaîne adsorbés par les molécules d'acides humiques ; moins acides que les premiers, peu mobiles dans le sol, ils exercent peu d'action sur l'argile et le fer. Déjà plus polymérisés que les précédents, on les obtient par extraction à la soude diluée, en même temps que les suivants.

H_1 = *acides humiques libres* : incomplètement saturés, à petites molécules et faiblement liés aux molécules d'argile c'est la forme la plus mobile des acides humiques, celle qui donne la structure la moins stable. Obtenue par attaque directe par la soude diluée et précipitation en milieu acide, cette fraction comprendrait : les précurseurs des acides humiques (provenant de l'oxydation incomplète de la lignine ;

complexes dispersés, migrant dans les podzols en entraînant le fer) et les acides humiques bruns proprement dits (dérivant de l'oxydation et de la transformation de la lignine ; composés relativement peu stables avec l'argile, pauvres en azote, flocculant lentement par le calcium, de couleur brun-rouge).

H_2 et H_3 = *acides humiques gris* : ils dérivent de synthèses microbiennes et sont liés intimement avec l'argile, formant un complexe argilo-humique très stable :

- Les acides humiques H_2 liés aux argiles par le Ca^{++} , composés très polymérisés, adsorbés par les colloïdes minéraux sont obtenus, après décalcification du sol, par solubilisation au moyen de soude diluée ;
- Les acides humiques H_3 liés aux argiles par l'intermédiaire des sesquioxides de Fe^{+++} ou d' Al^{+++} sont aussi très polymérisés et ne peuvent être extraits par la soude diluée, qu'après attaque partielle des liaisons fer-aluminium molécules d'argile par SO_4H_2 à chaud.

Le rapport entre les fractions stables et très polymérisées ($H_1 + H_2$) et les fractions mobiles et faiblement polymérisées semble être une caractéristique importante des sols. D'après C. Thomann (1964) ce rapport serait de 5 pour les sols bruns argileux du nord du Sénégal et passerait à 2,5 pour les sols bruns subarides sur sables, à 1,4 pour les sols bruns rouges et, en allant vers des régions de plus en plus humides, à 0,2 pour les sols ferrugineux tropicaux lessivés et enfin à 0,1 pour les sols faiblement ferralitiques.

L'humus comporte également des corps hydrosolubles : les acides créniques. L'humus et l'argile du sol sont des colloïdes électronégatifs. Leur union constitue le complexe argilo-humique qui peut fixer des ions positifs (complexe absorbant). En dehors du squelette minéral et du complexe absorbant du sol, on y trouve bien d'autres composés. Il peut y avoir du calcaire néoformé en masses volumineuses ou sous forme très diffuse. Le dosage du calcaire actif donne une idée de la rapidité avec laquelle ce calcaire peut passer en solution (test de Drouineau).

Les éléments nécessaires à la croissance des plantes, éléments majeurs et oligo-éléments se trouvent dans le sol soit sous forme organique, soit

sous des formes plus ou moins solubles, soit fixés sur le complexe absorbant.

Il y a dans le sol de l'air, de l'eau et les produits solubles qu'elle renferme. La capacité de rétention d'un sol pour l'eau est le pourcentage d'eau que ce sol contient 48 h après une pluie s'il draine normalement. La valeur de cette capacité de rétention détermine en partie les possibilités de ravitaillement en eau de la végétation.

VII. — Autres caractères

Dans la description d'un profil les pédologues s'efforcent de noter tous les renseignements qui sont susceptibles de compléter la connaissance du sol.

La *couleur* est déterminée par référence à un code international qui est le code Munsell. La *structure* est le mode d'arrangement des agrégats du sol. Les *inclusions* sont tous les accidents qui constituent des hétérogénéités dans le sol : cailloux, concrétions, dépôts salins, cristaux de gypse, etc. La friabilité et la consistance des agrégats, la forme des limites entre les horizons, les racines et les pores, les terriers et les trous de vers, bref tout ce qui est visible doit être noté. Certains tests faciles comme celui de l'acide chlorhydrique permettent de reconnaître la présence du calcaire ou d'autres composés.

Des analyses de laboratoire permettent de préciser la connaissance du sol. Elles portent sur la granulométrie, le taux de matières organiques, le calcaire, le pH, le complexe absorbant, les éléments fertilisants, le rapport entre le carbone et l'azote dans la matière organique (C/N), le fer « libre » c'est-à-dire (à peu près) celui qui n'est pas engagé dans des structures cristallines, les sels solubles, la nature des argiles, etc.

VIII. — L'étude pédologique

Etudiant un sol, l'agrogéologue concentre surtout son attention sur la base de son profil ; l'agronome sur son sommet. Le pédologue en observe l'ensemble, dans sa succession d'horizons, avec toutes ses variations d'un point à un autre, telles qu'elles apparaissent sur le terrain à l'intérieur de chaque volume élémentaire de sol (« pédon » au sens américain). Mais la définition des types doit être envisagée dans leur position géographique et topographique. Le développement, la répartition, les caractères du sol sont étudiés pour cela par rapport aux facteurs de différenciation : âge, climat local, roche-mère, topographie, végétation, utilisation par l'homme.

Cette étude peut porter uniquement sur la morphologie du profil. Elle peut essayer d'en préciser aussi la pédogenèse, ensemble dynamique des processus physiques, chimiques, biologiques et mécaniques qui se développent à l'intérieur de sa masse : réactions de surface, migration d'éléments à l'intérieur du profil et en provenance — ou à destination — de profils voisins, sous l'influence surtout de la gravité, de la capillarité, du cycle biotique, etc. Se développant au long des siècles et même de dizaines de millénaires en fonction des variations possibles de l'ensemble de leurs facteurs, ces phénomènes pédogénétiques aboutissent à la formation du sol actuel. L'étude de la dynamique du sol guidée par l'observation de sa morphologie permet une définition rigoureuse des types et amorce la recherche des causes. L'Ecole française de pédologie est dans sa majorité morphogénétique.

CHAPITRE II

LES FACTEURS DE DIFFÉRENCIATION DES SOLS

Cinq principaux groupes de facteurs sont responsables de l'existence à la surface de la terre, de sols très différents.

Trois facteurs sont strictement indépendants les uns des autres. C'est le *matériau*, appelé souvent roche-mère ; la *durée* de l'altération de ce matériau et le *climat* ou les climats successifs qui ont régné durant cette altération.

Deux autres groupes de facteurs liés aux précédents sont la *topographie* qui dépend du climat, de la roche et de la durée et l'ensemble des *facteurs biologiques* dont les relations avec les autres facteurs sont particulièrement complexes.

I. — Le matériau

La roche sous-jacente détermine bon nombre des caractères des sols et surtout des sols jeunes. Mais le sol se forme aussi, pour ses horizons superficiels, à partir d'un voile mince de quelques millimètres à quelques décimètres d'épaisseur de matériaux d'apport étrangers à la roche sous-jacente. La surface du sol reçoit chaque année une faible quantité de matériaux cosmiques.

On a cru longtemps que les propriétés chimiques du matériau avaient une influence majeure sur l'évolution du sol. Les sols formés sur des roches riches en bases ayant des argiles de type illite ou montmorillonite, auraient une capacité d'échange plus élevée et seraient plus fertiles. Les roches acides donneraient des sols avec une argile de type kaolinite et seraient plus pauvres.

Les derniers travaux sur l'altération (Pedro, Millot, Birot) insistent aussi sur l'importance des deux caractères suivants : la perméabilité de la roche et la vitesse de la circulation des solutions du sol.

Un engorgement de la roche par mauvais drainage, une lente circulation des solutions du sol surtout en climat sec déterminent la formation d'argile à forte capacité de rétention. Au contraire, une forte perméabilité et la percolation de grandes quantités d'eau diluent les solutions en contact avec les minéraux ; les produits de l'altération sont plutôt du type de la kaolinite ou de la vermiculite.

Les propriétés physiques de la roche peuvent donc influencer considérablement la genèse des sols. Il n'en reste pas moins que certains éléments chimiques des roches, les bases, les éléments fertilisants et les oligo-éléments, conditionnent largement la valeur agronomique des sols.

Classification des roches en fonction des sols

1. **Roches friables.** — Pour la plupart l'air, l'eau et les racines les pénètrent facilement. Toutes se désagrègent facilement (argile, marnes, sables, alluvions, loess, etc.). Elles n'ont pas la structure d'un sol et de nombreux constituants des sols en sont absents, mais leur colonisation par les plantes est facile. Elles peuvent évoluer en sols assez vite (deux siècles sous nos climats) et donnent naissance à des sols profonds.

2. **Roches massives acides.** — Granites et roches voisines, quartzites, grès siliceux. Sur ces roches, l'alimentation des plantes est déficitaire et la pauvreté en ions métalliques ne permet que la formation d'une argile de type kaolinite ou vermiculite. Il y a dans ces roches beaucoup de quartz difficilement altérables qui donnent des sables et qui diluent dans la masse les processus d'altération. Les sols sont souvent lessivés, leur chimisme est le plus souvent dominé par la matière organique et ils sont pauvres.

3. **Roches massives basiques.** — Basaltes, gabbros, péridotites. Les fortes teneurs en ions basiques alcalinoterreux, tant qu'elles se maintiennent, orientent les néosynthèses à l'intérieur du sol vers la formation d'argiles à forte capacité d'échange. Sur ces roches, les sols se différencient considérablement sous l'action des facteurs de la pédogenèse ; la plupart sont fertiles mais ont parfois des propriétés physiques qui les rendent difficiles à travailler.

4. **Roches calcomagnésiennes.** — Roches à base de calcaire ou de dolomie. Les carbonates sont peu à peu dissous par les eaux et les acides organiques. La nature du sol dépend beaucoup de la nature et de la proportion des impuretés de la roche. Mais la présence de calcium et de magnésium en forte proportion donne naissance à un humus très stable qui se traduit par une structure grenue ; cet humus se dégrade lentement. La nutrition azotée est déficitaire. Les oligo-éléments et le phosphore sont sous des formes peu assimilables.

5. **Roches consolidées à base d'argile.** — Schistes et mica-schistes. Ces roches ne peuvent donner par altération que les argiles dont elles sont constituées, ou leurs produits de dégradation. Mais elles se délitent rapidement à cause de leur structure feuilletée ; les sols formés sur ces roches évoluent plus lentement que sur la plupart des roches voisines.

6. **Roches salines.** — Sels, gypse, etc. Elles donnent naissance à des sols particuliers dans lesquels la présence du sel provoque des phénomènes qui modifient l'état des argiles et la physiologie des plantes.

Ce qui importe le plus, dans le matériau d'un sol c'est la nature des minéraux altérables, le bilan des ions basiques, ainsi que les propriétés physiques, qui accélèrent ou peuvent même orienter les processus de formation du sol.

II. — Le climat

Il joue un rôle considérable dans la formation et la différenciation des sols. A l'échelle mondiale une carte des sols recouvre presque exactement une carte des climats.

Les pluies et la chaleur sont les causes premières de l'altération des roches. Lorsque les facteurs climatiques sont minima comme dans les déserts froids ou dans les déserts chauds et secs, le sol ne se forme pas.

Sur des roches identiques on trouve des sols différents si le climat n'est pas le même. Ainsi, sur un granite mésocrate, granit de composition moyenne, il y a dans les zones froides du nord de l'Europe (Finlande) des sols peu développés de 30 à 40 cm d'épaisseur avec un humus très acide, presque pas d'argile et une faible individualisation des oxydes de fer. En France, sous un climat tempéré humide (Vendée), on peut trouver des sols lessivés avec un humus doux bien lié au matériel minéral et une accumulation d'argile entre 50 et 100 cm, surmontant une arène granitique. En Afrique centrale, sous un climat tropical humide, il existe sur ce même granite un sol ferrallitique avec un horizon riche en alumine et en hydroxydes et un horizon d'argile bariolé dont l'épaisseur peut dépasser plus de 10 m.

La quantité d'eau qui peut traverser le sol et le sous-sol joue un grand rôle dans la pédogenèse. Cette quantité dépend des pluies mais aussi des températures. Ces dernières conditionnent l'évaporation soit directement, soit par l'intervention des plantes. Les températures du sol lui-même déterminent la rapidité des phénomènes chimiques d'altération des roches. Les autres éléments du climat, comme le vent, l'humidité de l'air, la lumière ont des rôles indirects par l'intermédiaire des végétaux.

G. Aubert et S. Henin ont cherché à mesurer la quantité d'eau qui traverse un sol par l'étude des données d'expériences faites dans des cases lysimé-

triques et par les mesures d'écoulement des eaux dans des bassins versants de nombreux fleuves.

A la suite de ces travaux ils ont proposé les formules suivantes :

Pour un sol « moyen » le drainage D , c'est-à-dire la quantité d'eau qui traverse le sol pour arriver au sous-sol et aux nappes phréatiques, est relié aux précipitations annuelles par la formule :

$$D = \frac{\gamma P^3}{1 + \gamma P^2}$$

γ est un coefficient global, moyen, exprimant « l'action des facteurs d'évaporation du « milieu » ». Pour le bassin versant de Paris $\gamma = 0,76$.

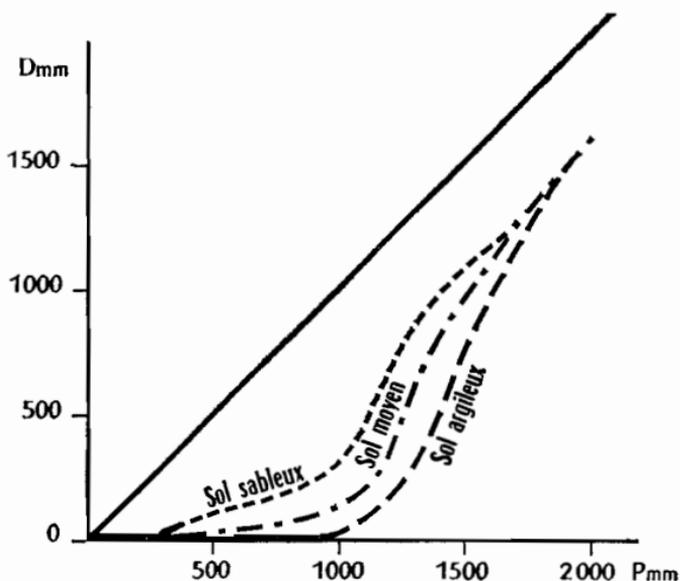


Fig. 1. — Courbe de drainage en fonction des précipitations d'après la formule de G. Aubert et S. Henin, pour une température moyenne annuelle de 20° C.

S. Henin a proposé la formule suivante reliant γ à la température moyenne annuelle :

$$\gamma = \frac{1}{0,15 T - 0,13}$$

La courbe de variation du drainage en fonction des précipitations pour 20° C de température annuelle montre que le drainage est pratiquement nul en dessous de 400 mm de précipitations annuelles et qu'il ne devient important qu'au-dessus de 750 mm.

L'influence de la texture du sol se traduit par un déplacement de la courbe de drainage par le bas dans le cas des textures fines et vers le haut dans le cas des textures sableuses. Ceci a été vérifié par Dutil (1962) à Batna (Algérie) dans des expériences en cases lysimétriques.

La température décale aussi la courbe du drainage en fonction des précipitations : le drainage augmente pour des températures moyennes basses et diminue pour des températures élevées.

On a cherché à relier la nature des sols et le climat en utilisant des indices climatiques. Il existe un grand nombre de ces indices qui sont des nombres calculés à partir des paramètres du climat. Par exemple les indices de Lang et de Martonne qui sont des indices d'aridité, ceux de Birot, Emberger et Gaussen qui mesurent le plus ou moins grand degré de sécheresse du climat.

G. Bryssine a proposé l'utilisation conjointe en pédologie de l'indice d'aridité de Lang $I = \frac{P}{T}$ et d'un indice d'énergie climatique $E_c = P \times T$, P et T étant les précipitations et les températures moyennes annuelles du lieu considéré.

On peut porter sur un graphique P en abscisse et T en ordonnée. Les courbes pour lesquelles I est constant sont des droites passant par le centre et celles pour lesquelles E_c est constant sont des hyper-

boles équilatères. En coordonnées logarithmiques, ces courbes sont des droites inclinées à 45° sur les axes.

Si on étudie la répartition de deux types de sols, les chernozems et les podzols par exemple, on constate que les points représentatifs des stations où existent ces sols se répartissent sur une assez vaste portion du graphique. Ce fait traduit l'influence de la roche-mère et de la durée d'évolution sur le type de sol : les podzols sont des sols de climat nordique assez froid mais l'existence de roches très acides et très perméables (sables de Gascogne) permet leur existence dans des régions assez méridionales.

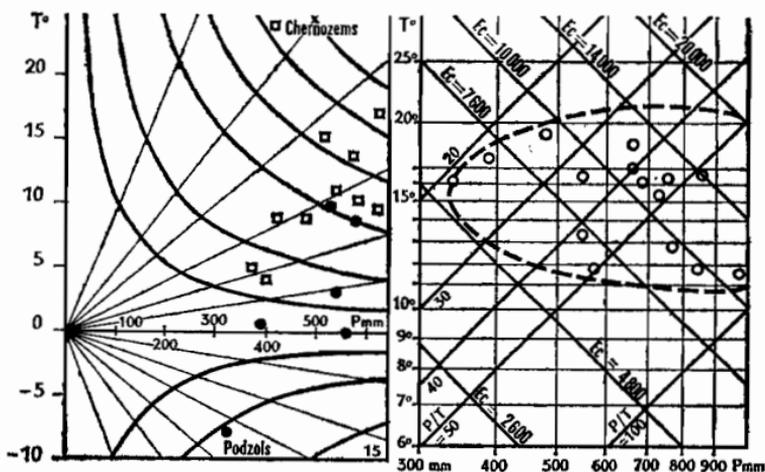


Fig. 2. — Diagrammes de Bryssine. A gauche, en coordonnées cartésiennes, répartition des stations climatiques correspondant aux chernozems et aux podzols ; à droite, en coordonnées logarithmiques, les sols rouges méditerranéens.

Un même sol, par exemple les sols rouges méditerranéens sur calcaire cristallisé, peut exister sous des climats très variés (fig. 2). En effet ce sont

souvent des sols anciens qui ont pu se former à des époques où le climat était différent de ce qu'il est aujourd'hui. L'utilisation du graphique permet de dissocier les facteurs qui ont permis la formation d'un même sol dans des conditions différentes.

Les pédologues résument souvent les données climatiques sur un climogramme. Le plus utilisé actuellement est le graphique ombrothermique de Gaussen. On représente la variation mensuelle des précipitations et des températures moyennes, mais avec des conventions graphiques normalisées : la même unité représente 1 mois (en abscisse) 20 mm de précipitation et 10° de température (en ordonnée).

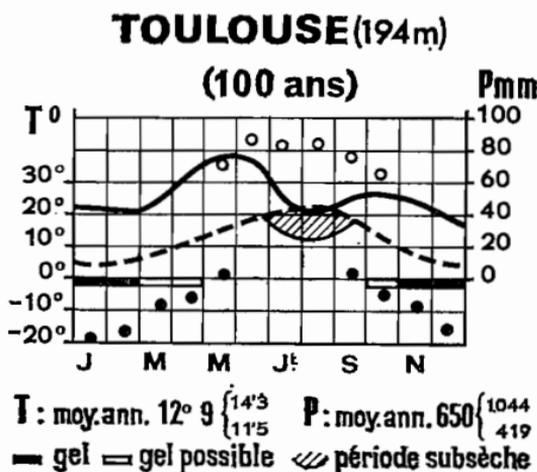


Fig. 3. — Climogramme de Gaussen ou diagramme ombrothermique pour la station de Toulouse.

Tous ces graphiques sont homothétiques entre eux : on peut donc comparer leurs formes sans tenir compte de l'échelle (fig. 3). Or c'est la forme du graphique qui permet de classer les climats : en

effet le rapport des unités des précipitations et des températures est tel que lorsque la courbe ombrique passe sous la courbe thermique, commence en fait, dans la nature, une saison sèche pour les végétaux et aussi pour le sol. On appelle indice xérique = x , la durée en jours de la saison sèche ainsi mesurée sur le graphique. La forme des graphiques permet de distinguer entre eux des climats qui ont des caractéristiques globales communes.

Le climat du lieu est défini par des mesures faites dans l'air. Il existe dans le sol des conditions climatiques spéciales dont l'ensemble constitue le *pédoclimat*.

III. — Le temps

Les propriétés et l'évolution du sol varient en fonction du temps. La durée peut intervenir comme un facteur de différenciation de trois manières différentes :

- Certaines propriétés du sol varient en fonction de l'heure : la température, la teneur en CO_2 de l'atmosphère du sol et l'activité des éléments vivants ;
- D'autres varient en fonction de la saison : la teneur en eau, la teneur en azote nitrique, le pH, etc., mais ces paramètres du sol reprennent pratiquement les mêmes valeurs au bout d'une année.
- Enfin d'autres varient au cours des années : un sol passe par des phases de jeunesse, de maturité et de vieillesse. Sur une même roche-mère l'évolution pédologique donne des sols qui évoluent dans le temps, se succèdent et présentent généralement des caractères de plus en plus accentués (Van Baren et Mohr l'ont particulièrement bien mis en évidence pour les sols ferrallitiques).

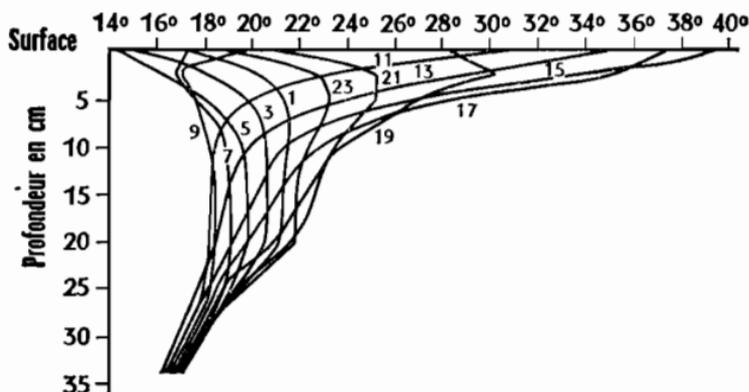


Fig. 4. — Variation de la température du sol en fonction de la profondeur pour les heures impaires de la journée, d'après Geiger.

Cette évolution des sols en fonction du temps est assez lente. Le Russe Akimow a étudié, en 1930, les sols formés sur les murs de la forteresse de Kamenetz abandonnée depuis 1700. Ces sols étaient exactement les mêmes que sur les roches qui avaient servi à construire la forteresse (ces calcaires évoluent pour donner une rendzine, sol riche en humus mais peu épais).

Pour se former dans la nature, un podzol met de 300 à 1 800 ans et pour qu'un sol perde 10 % de calcaire il faut 300 ans dans les polders de Hollande.

Mais au cours des âges le climat a changé plusieurs fois et les sols âgés peuvent garder les traces de ces climats passés. En Europe occidentale et dans le bassin méditerranéen, le climat a été plus humide et plus chaud il y a quelques millénaires et ceci après une période plus froide et plus sèche, précédée elle-même d'une période plus chaude et peut-être subtropicale. Tous ces climats ont laissé des traces dans le modelé du terrain. Les plus évidentes sont les terrasses des cours d'eau, séries de dépôts formant des replats étagés sur les flancs des vallées.

La différenciation des sols en fonction du temps a été bien étudiée par les pédologues français sur les terrasses alluviales

des oueds d'Afrique du Nord. En France, aussi, sur les terrasses récentes, on trouve des sols peu évolués, jeunes ; sur les terrasses moyennes des sols déjà mûrs dont le profil est bien développé ; tandis que sur les terrasses anciennes se trouvent des sols lessivés et très appauvris. C'est ainsi que les très anciens dépôts du Rhône qui constituent la costière du Gard sont recouverts de « paléopodzols » caillouteux tandis que les terrasses plus récentes ont des sols de plus en plus jeunes et de plus en plus fertiles (Rutten et Vigneron).

De tels sols, formés sous un climat différent du climat actuel, sont des « sols hérités ».

Des traces moins visibles, mais peut-être plus importantes pour les sols, ont été laissées par les solifluxions périglaciaires qui ont mis en mouvement sur les pentes la couverture meuble. En Europe du Nord la plupart des sols ont été détruits à cette époque ; les sols actuels y sont le plus souvent post-glaciaires. Au contraire, dans la zone méditerranéenne, les sols anciens sont plus répandus (sols rouges), malgré l'érosion provoquée par l'homme.

Au cours d'un passé plus récent, les plaines et vallées alluviales ont été formées presque toujours d'alluvions déposées dans le lit même de la rivière, ou sur ses rives au moment des crues. Les sols de ces vallées sont jeunes et peu évolués.

IV. — La topographie

C'est une observation courante que les sols varient avec elle : sur le flanc d'un vallon ils sont moins épais que sur le plateau ou dans le bas-fond. La forme du terrain est donc un facteur de différenciation des sols. Mais la topographie interfère avec les autres facteurs de formation pour modifier la nature du sol :

— Elle est en relation avec le facteur temps : en effet les différentes portions de surface d'une

zone donnée ont été formées à des époques qui peuvent être très différentes : elles peuvent avoir cessé d'être la proie de l'érosion accélérée (flanc de montagne) ou encore, avoir cessé d'être remblayées (régions lunaires ou alluviales), à des époques très différentes ;

- La topographie est liée au climat : par exemple un même calcaire prendra en pays tempéré une morphologie karstique en creux, tandis qu'en zone tropicale il aura une topographie en pitons (baie d'Along). Réciproquement le pédoclimat est lié à la topographie : il est, par exemple, plus sec sur les pentes, plus humide dans les bas-fonds ;
- La forme des terrains dépend de la roche-mère : sous un même climat, des surfaces d'âge identique seront très différentes s'il s'agit d'un affleurement granitique (dômes et vallées plates) ou d'un calcaire (karst avec dolines) ;
- La nature du sol varie avec la forme même du terrain : toutes les topographies plates favorisent l'engorgement du sol par l'eau. Les pentes fortes au contraire favorisent la sécheresse du sol par suite du ruissellement et de l'écoulement latéral interne des eaux d'infiltration. Ces eaux peuvent avoir dissous des éléments du sol et les redéposer plus loin : c'est le cas du fer dans les cuirasses de bas de pente ou de bas-fond des régions tropicales.

La topographie est donc à la fois une manifestation particulièrement évidente de variations d'âge, de climat, de roche, et aussi une cause d'évolution propre du sol.

Un autre phénomène en relation avec la topographie est le déplacement des sols. Les eaux

courantes, par micro-érosion et dépôt à quelques centimètres de distance, font migrer les éléments superficiels. Sur une pente, un sol sec gonfle par humectation et par action du gel. Il est alors soumis à des forces qui sont normales à sa surface. Au séchage, la pesanteur agit et provoque une descente de quelques millimètres de la couche intéressée. Après une forte pluie la couche humectée glisse parfois sur la couche sous-jacente sèche : c'est le « creep ». Dans certaines argiles et marnes, ce phénomène est accentué par la présence en profondeur d'une zone fluante qui sert de lubrifiant (glissement de terrain).

On peut distinguer deux types extrêmes d'évolution du relief :

- *L'érosion accélérée* due à l'attaque mécanique violente des roches ou des sols par les agents climatiques (pluie, ruissellement, vent) et au déblaiement immédiat des produits de cette attaque ;
- *L'érosion géologique*. La vitesse d'usure du sol est assez lente pour que sa vitesse de formation par décomposition des roches compense les pertes subies (F. Fournier).

Tous les éléments de la roche-mère susceptibles de se dissoudre ou d'être mis en suspension, et d'être entraînés plus ou moins profondément par les eaux d'infiltration, ou remontés en surface constituent la phase migratrice. La phase résiduelle ne s'altère qu'à la longue, et constitue le squelette minéral du sol. Les périodes d'érosion géologiques du sol sont appelées phases de biostase, par opposition aux périodes d'érosion accélérée, dites phases de rhexistase (du grec *rhexis*, rupture) (Erhart, 1956).

L'érosion accélérée se produit surtout après des mouvements tectoniques, des changements de climat, et l'intervention de l'homme. Sur des pentes accentuées, elle peut déblayer d'énormes quantités de matériaux. L'érosion géologique a surtout lieu quand le climat permet à une végétation dense de couvrir le sol.

L'étude scientifique de la topographie et de ses causes est l'objet de la géomorphologie. Les pédologues en utilisent fréquemment les méthodes et les techniques.

L'examen des cartes topographiques, surtout des cartes en courbes de niveau, peut apporter au pédologue de très nombreux renseignements. Chaque fois que les courbes de niveau ne sont ni parallèles ni équidistantes, c'est-à-dire chaque fois que la pente n'est pas régulière, il y a possibilité de variation du sol en fonction de la topographie. En terrain plat ou presque plat, on a intérêt à déceler les moindres ondulations qui correspondent presque toujours à des différences de sols.

Ces ondulations de très faible amplitude ne sont guère visibles même sur des plans au 1/20 000 ; on peut les déceler en observant le terrain à la jumelle, qui rapproche et déforme les plans de vision.

Une des meilleures techniques d'études du relief est l'observation des photographies aériennes avec un stéréoscope. On se sert pour cela de photographies successives prises en série par un avion. Chaque portion de terrain se trouve photographiée au moins deux fois. En regardant avec chaque œil deux portions de clichés correspondant à une même surface, on voit parfaitement le relief, qui est même exagéré par les loupes du stéréoscope.

V. — Les facteurs biologiques

Les facteurs biologiques sont les animaux, les végétaux, les micro-organismes et l'Homme. Ces êtres vivants ont une action très importante. Certains sont les transformateurs initiaux de l'énergie

chimique qui permet au sol d'évoluer et d'autres utilisent en partie cette énergie à des transports qui modifient le sol. Mais l'existence des êtres vivants est liée au climat, et, par l'intermédiaire du sol lui-même, à la roche-mère et aux facteurs déjà passés en revue.

1. **Les animaux** provoquent des transports de matière : citons les terriers comblés par les écoulements par gravité et les édifices de tous les animaux fouisseurs. Les vers de terre, les termites et les fourmis ramènent en surface les éléments des horizons profonds.

Les animaux contribuent à la transformation de la matière organique : on a découvert assez récemment que la matière organique est souvent digérée par de très petits animaux du sol avant d'être transformée en humus. (Collemboles et autres animalcules de quelques dixièmes de millimètre de long). Les gros animaux eux-mêmes, par leurs déjections et leurs cadavres, sont un facteur de dispersion des éléments fertilisants des sols.

2. **Les végétaux** agissent par remontée des cations puisés par les racines et concentration en surface ; par dispersion à faible distance : les feuilles, les grains de pollen ne retombent pas exactement là où ils ont été synthétisés.

La plante protège le sol contre les éléments atmosphériques en diminuant leur action et en modifiant le pédoclimat.

Grâce à la lumière solaire, l'appareil végétatif aérien des plantes synthétise les matières organiques qui se transformeront ensuite en humus. Au niveau des poils absorbants de l'appareil racinaire, les plantes séparent certains constituants

du sol qui passent sous forme soluble. Les racines pénètrent dans la roche et agrandissent les fissures en développant des forces osmotiques considérables. Les racines respirent ; dans la rhizosphère du sol les caractères physico-chimiques sont considérablement modifiés, le pH, le rH^2 et la teneur en CO_2 ainsi modifiés permettent la prolifération, autour des racines, de micro-organismes qui participent à l'évolution du sol.

Ces actions multiples font peu à peu évoluer le sol. Mais la végétation évolue, aussi, au fur et à mesure que le sol se transforme. Il y a donc à chaque stade d'évolution du sol une certaine association de plantes caractéristiques du sol.

3. Les micro-organismes sont surtout des transformateurs des substances chimiques du sol : ils interviennent dans de nombreux cycles d'éléments importants : azote, carbone, fer, soufre, etc. La microbiologie du sol étudie l'action de ces micro-organismes.

4. L'homme intervient d'abord par le prélèvement de matières. Il en accumule les résidus autour des agglomérations. Il modifie la nature et la topographie du sol par ses travaux : labour, défoncement, cloisonnement des surfaces ; il peut aussi bien accélérer l'érosion que la supprimer, suivant la nature de son exploitation du sol (voir p. 117 et suiv.).

CHAPITRE III

LA CLASSIFICATION DES SOLS

La classification des sols présente, par rapport à celle d'autres objets naturels ou êtres vivants tels que les minéraux, les animaux ou les plantes, certains caractères bien particuliers. Elle se rapproche plus de celle des groupements végétaux, et, jusqu'à un certain point, des roches.

Les sols, forment en effet un véritable « continu » à la surface du globe. La séparation entre les unités reste très progressive la plupart du temps et les sols ne dérivent pas les uns des autres. Aussi ne peut-on leur appliquer ni le principe de similitude maximum à l'intérieur des unités, ni celui de parenté et de filiation. En intégrant l'ensemble des facteurs de formation des sols, une classification pédogénétique se rapproche le plus possible de celle des êtres vivants. Pour être parfaitement intrinsèque, elle doit comporter des définitions de chaque élément des diverses catégories en fonction des caractères des sols eux-mêmes ; elle doit être morphogénétique. Elle doit en même temps être logique et satisfaire au principe d'homologie et de subordination des critères de définition des différentes unités. Elle doit également être générale et correspondre à tous les sols du monde quels que soient le détail et la précision de leur étude ; elle doit

aussi, être utilisable sur le terrain et applicable à la solution de problèmes pratiques tels ceux posés par l'agronomie. La classification généralement utilisée par les pédologues français répartit les sols en classes et sous-classes en fonction de leurs conditions physiques ou climatiques, physico-chimiques et chimiques d'évolution qui s'expriment par un certain nombre de caractères essentiels :

- Degré d'évolution du sol et développement du profil ;
- Mode d'altération défini par la nature des sesquioxides libérés qui se maintiennent individualisés ou constituent des complexes caractéristiques et par l'importance relative de cette libération, ainsi que par la dominance de certains types d'argile ;
- Type et répartition de la matière organique, susceptible d'influer sur l'évolution du sol et la différenciation des horizons du profil ;
- Certains phénomènes fondamentaux d'évolution, tels que l'hydromorphie (ou hydrogenèse) et l'halomorphie (ou halogenèse). Ces deux types de processus peuvent en effet être si développés qu'ils modifient entièrement le mode d'évolution du sol et son profil. En ce cas seulement, ils sont pris comme caractéristiques de classes de sols.

Les classes et sous-classes sont subdivisées en groupes de sols, définis par des caractères morphologiques du profil correspondant à des processus d'évolution de ces sols : différenciation de certains horizons, lessivage du calcaire, des éléments colloïdaux, etc. Les groupes comprennent en général plusieurs sous-groupes dont les caractères essentiels des profils sont les mêmes, mais qui sont différenciés

soit par une intensité variable, d'une unité à l'autre, du processus fondamental d'évolution caractéristique du groupe, soit par la manifestation d'un processus secondaire, indiqué par certains éléments nouveaux du profil (concrétionnement, induration, taches d'hydromorphie, élargissement de la structure, etc.). Les sous-groupes sont parfois subdivisés en faciès correspondant à de simples tendances évolutives, de signification régionale. A l'intérieur des sous-groupes ou des faciès, nous distinguons des familles de sols, en fonction des caractères pétrographiques de leur roche-mère ou de leur matériau originel. Les séries y correspondent à des différenciations de détail du profil : profondeur du sol, d'un horizon d'accumulation ou d'un horizon induré, épaisseur de certains horizons principaux, forte teneur en éléments grossiers et, le cas échéant, position dans le « paysage ». Dans certains cas, les séries sont subdivisées en types de sols en fonction des caractères précis de la texture de leurs horizons supérieurs, et en phases qui correspondent à de faibles variations des profils par suite de modifications temporaires ou d'actions de courte durée : mise en culture, faible érosion, etc.

DEUXIÈME PARTIE

LES DIFFÉRENTS TYPES DE SOLS

Il n'est pas possible, dans un cadre aussi restreint, de passer en revue toutes les unités de la classification des sols même en se limitant aux groupes.

Dans ce qui suit nous donnerons seulement, classe par classe, des indications très générales sur les processus de formation des sols, et sur les principales variations qui peuvent exister autour d'un type central.

I. — Classe des sols minéraux bruts

1. Les pédologues français estiment, contrairement à certains autres, que toutes les surfaces exondées où la vie peut se manifester doivent être considérées comme des sols. S'il s'y trouve seulement une roche saine ou désagrégée, cela indique que les facteurs de la pédogenèse sont tels qu'il ne peut en être autrement. Il est utile dans un inventaire des sols, de signaler ces sols minéraux bruts et de les représenter sur les cartes malgré leur très faible évolution et leur peu d'intérêt pratique.

Leur profil est du type (A) CR. Ils ont donc un horizon de surface parfois terreux mais pratiquement dépourvu de matières organiques bien que la vie n'en soit jamais totalement absente (Kilian). En dessous se trouve la roche saine parfois désagrégée ou remaniée par des phénomènes physiques (hori-

zon C). Les horizons (A) et C peuvent être très peu épais ; le sol se réduit alors pratiquement à une simple roche.

Les sols minéraux bruts n'ont pas de valeur agronomique. Leur étude, dégagée de « l'hypothèque agricole », permet de mettre en évidence des caractères génétiques qui sont parfois masqués pour les autres sols.

Leur caractère commun est l'absence d'évolution de la matière minérale qui reste à l'état brut. La cause peut en être la faible durée de formation du sol ; une roche-mère mise à nu ou accumulée par un phénomène géologique, climatique ou humain, est un sol minéral brut (exemples : rocher, dune actuelle, éboulis, remblai). Mais ce caractère est provisoire et dès qu'un temps suffisant sera écoulé, le sol évolué en fonction des conditions écologiques de la région et de la roche-mère commencera à se former. On a affaire à un sol minéral brut accidentel.

L'absence d'évolution peut être due à des causes climatiques ; le vent peut abraser constamment une roche-mère ; dans l'optique pédologique, c'est un sol minéral brut climatique. Les crues font de même dans le lit majeur des fleuves, et les pluies en haute montagne.

Dans les déserts chauds, c'est la rareté des pluies qui, même après des millénaires, entraîne la formation d'un complexe superficiel pratiquement dépourvu de matière organique.

Ces « sols » peuvent être le siège de remaniements dus à des phénomènes physiques ou chimiques : cristallisation, évaporation, organisation des éléments, etc. Il y a donc des sols minéraux bruts organisés et non organisés.

Suivant le caractère meuble ou non du matériau, on distingue des sols minéraux bruts meubles, les

régosols, et des sols minéraux bruts, massifs et compacts, les lithosols.

Les remaniements physiques et même chimiques ont lieu facilement dans un matériau meuble tandis qu'ils sont beaucoup plus rares dans un matériau massif. Les sols polygonaux prendront facilement naissance à partir d'une alluvion caillouteuse. A partir d'une roche très dure, comme le granite, leur formation sera très lente. Les tendances évolutives se manifesteront rapidement dans un régosol accidentel, beaucoup plus lentement à partir d'un lithosol : le sable d'une dune évoluera en quelques siècles dans un climat humide pour former un podzol.

2. Sols minéraux bruts climatiques des déserts chauds. — Dans les déserts chauds (Sahara), où les routes ne sont le plus souvent que des pistes ou des itinéraires jalonnés de loin en loin par des balises, l'utilisateur du sol n'est pas le paysan mais le voyageur. Touareg ou pétrolier, il a donné des noms aux sols du désert : regs, takyrs, ergs, fech-fech, etc. ; et les concepts auxquels ils correspondent reflètent ses propres préoccupations de voyageur.

A cause de l'absence de végétation, la surface du sol n'est pas protégée contre l'action des agents de l'érosion qui, quoique ayant souvent une faible intensité, peuvent avoir un rôle important.

Les regs. — Dans le Sahara on désigne sous le nom de regs de vastes zones aplaties (grandes plaines, lambeaux de terrasses ou de pédiments). La circulation y est facile, car la surface est recouverte par des cailloux, des graviers ou des sables très grossiers dont la portance est généralement bonne. En fait ce terme de reg désigne soit des unités morphologiques (vastes plaines), soit le type de terrain de surface qui leur est généralement associé, soit le

sol, soit même l'horizon de surface de ce sol qui est aussi désigné par le terme de pavement désertique.

Ce pavement est constitué de cailloux, graviers ou sables très grossiers façonnés par le vent ; des sables éoliens, le plus souvent siliceux se déposent entre les cailloux. L'ensemble n'a que quelques centimètres d'épaisseur (2 ou 3 en moyenne).

C'est un résidu d'une érosion éolienne ancienne, il joue un rôle protecteur vis-à-vis de l'érosion éolienne actuelle.

Le profil d'un reg est le suivant :

0-2 cm : sable siliceux non calcaire ;

2-30 cm : sable limoneux calcaire structuré ;

30 cm et au-dessous : sable et cailloux ou carapace calcaire.

Les takyrs. — Les auteurs russes ont décrit depuis longtemps, sous ce nom, des sols argileux, souvent salés, ayant un horizon de surface compact formé de polygones d'argile hexagonaux séparés par une zone déprimée ; l'ensemble a l'allure de soucoupes retournées et disposées régulièrement.

Les takyrs existent au Sahara (plaine alluviale du Guir) et dans les dépressions de la Côte française des Somalis.

3. Sols minéraux bruts climatiques des déserts froids. — Dès que la température moyenne s'abaisse l'activité des micro-organismes s'arrête. Par contre, la vie végétale peut résister à des conditions plus sévères. Elle ne disparaît que si la température du mois le plus chaud (juillet dans l'hémisphère Nord) est inférieure à 5° C. Le sol est gelé en profondeur (« permafrost ») ; le réchauffement estival n'intéresse que les quelques décimètres superficiels. Des mouvements de matière donnent aux sols minéraux bruts de ces régions froides des formes variées d'organisation : sols polygonaux, sols striés.

Le fractionnement des roches par le gel est le caractère dominant de ces sols.

II. — Classe des sols peu évolués

1. Cette classe groupe les sols pour lesquels l'altération des minéraux primaires est limitée à certains phénomènes n'impliquant que la mise en jeu d'une quantité limitée d'énergie comme la libération du fer, la séricitisation des feldspaths, etc. Il suffit pour cela que la durée d'évolution soit faible ou que le climat ne permette pas le développement de processus physico-chimiques énergiques. Il peut y avoir dans les divers horizons une division physique plus ou moins intense des matériaux primitifs, mais du point de vue minéralogique il n'y a pas de différence importante entre la fraction minérale du sol et la roche-mère.

L'horizon de surface est un horizon A parfois riche en matières organiques, sans différenciation de A₂. Il n'y a évidemment pas d'horizon B. Le profil est donc du type AC.

Au cours de son histoire un sol passe toujours par une phase de jeunesse, durant laquelle il est un sol peu évolué. Dès que les tendances évolutives y sont repérables, soit par la morphologie du profil, soit par les analyses, on classe le sol dans les autres grandes unités de la classification.

2. **Sols peu évolués climatiques.** — En marge des déserts, l'altération des roches reste très faible mais la végétation se développe au moins à certaines périodes de l'année : en été dans les zones froides, à la saison des pluies dans les zones chaudes.

Les sols ont un horizon superficiel A, contenant de la matière organique, puis un horizon C, à peine transformé recouvrant la roche inaltérée. En zone froide, la matière organique s'accumule car les micro-organismes ont une très faible activité. En

zone chaude, par contre, les micro-organismes sont actifs si l'humidité du sol est suffisante et la matière organique est rapidement dégradée.

Sols de toundra. — Dans les régions circumpolaires le sous-sol reste gelé en permanence. Les quelques décimètres superficiels dégèlent en été seulement : ces alternances de gel et de dégel entraînent un fractionnement intense et rapide des roches. De plus, la fusion de la neige fait que les couches superficielles deviennent fluantes ; il se crée dans cette masse des mouvements de convection qui rejettent les éléments les plus grossiers à la périphérie. Les surfaces soumises à ces mouvements s'organisent en réseaux polygonaux comme dans certains sols minéraux bruts. Il en existe de nombreux types.

Profil de sol polygonal, Spitzberg, N. Fédoroff (1964)

Sol de toundra à pustules de boue sur schistes, assez bien drainé. Végétation de mousses avec *Salix polaris* et *Petasites frigides*. Pustules de boue fendillée à contours circulaires irréguliers, déprimées par rapport aux couronnes de végétation périphériques. Diamètre de l'ordre du mètre. A_0 limité aux couronnes, lacis de racines et débris de mousses.

0-10 cm de la couronne : limon sableux mélangé à des débris de mousses, passant progressivement à un humus bien décomposé brun très sombre.

0-10 cm de la pustule : limon brun sombre, faiblement grenu, absence d'éléments grossiers ; assez nombreuses racines.

10-30 cm : limon brun jaune clair à taches gris ou brun sombre, faiblement nuciforme. Mélangé avec des éléments du A_1 sous les couronnes de végétation.

30-40 cm : limon sableux gris-brun sombre saturé en eau passant aux schistes sous-jacents.

Sauf dans l'horizon A_0 , plus riche en matières organiques, les analyses montrent une grande homogénéité : 30 % d'argile, 4 % de matières organiques, un total des bases échangeables de 26 me. Le C/N est de 12. Dans certains cas, sols de toundra moins bien drainés, l'humus est plus grossier et peut passer au type tourbeux.

Dans les régions tempérées, et plus rarement en régions tropicales des sols peu évolués ont été décrits sous le nom de *rankers*. Ils comportent un horizon A_1 riche en matières organiques passant brusquement à un horizon C. La roche-mère est toujours siliceuse.

Dans les *régions subdésertiques chaudes*, la matière organique disparaît au fur et à mesure qu'elle se forme. L'horizon A_1 est donc à peine visible. Par contre les sels solubles peuvent migrer.

Profil de sol subdésertique

Côte des Somalis, J. Boulaine (1962)

Plaine du Hanlé, sol de reg à épineux. P = 175 mm, T = 30°. Surface couverte de cailloux et graviers siliceux de 3 cm.

0-7 cm : limon beige clair, vésiculaire en surface, massif.

7-34 cm : sable fin limoneux marron clair, faiblement prismatique.

34-90 cm : limon sableux massif, dur avec quelques amas blancs de calcaire secondaire.

Les analyses montrent une légère accumulation de calcaire en profondeur. La teneur en matières organiques est inférieure à 0,1 %.

Les sols peu évolués climatiques sont en général limités aux régions subdésertiques. Mais dans des zones où les précipitations peuvent atteindre 500 mm, il arrive que la nature de la roche ne permette pas une évolution notable du sol ; c'est le cas en zone méditerranéenne sur les argiles et les schistes.

Les sols d'apport alluvial sont souvent des sols peu évolués si la durée d'évolution reste faible et cela quel que soit le climat. Enfin, certains types d'érosion, en mélangeant les horizons des sols et en déplaçant peu à peu toute la masse sur les versants, peuvent donner naissance à des *sols peu évolués d'érosion*.

III. — Classe des sols calcomagnésimorphes

1. Les sols dont la genèse est dominée par la présence des carbonates et des sulfates de calcium et de magnésium prennent naissance presque toujours sur les roches calcaires dolomitiques ou gypseuses, mais on rencontre aussi sur ces roches certains sols qui peuvent contenir du calcaire et qui appartiennent cependant aux classes des vertisols et des sols isohumiques.

La classe des sols calcomagnésimorphes correspond aux sols à complexe saturé par des cations bivalents, comportant un horizon superficiel relativement riche en matières organiques intimement liées au calcaire et aux éléments silicatés. Des horizons profonds peuvent exister, mais ce ne sont que des horizons (B) et C.

La présence d'ions bivalents en excès dans le sol a les conséquences suivantes, parmi d'autres :

— L'action flocculente des cations bivalents sur les colloïdes est beaucoup plus énergique que celle des monovalents. Ceci est surtout valable pour les colloïdes hydrophiles (colloïdes humiques).

— En milieu riche en calcaire actif, donc facilement soluble, le pH est un peu supérieur à 7. L'argile et l'humus ont alors, en théorie, une légère tendance à la dispersion mais l'ion calcium ou l'ion magnésium étant alors très abondants dans les solutions du sol, leur action l'emporte de loin ; les colloïdes sont à l'état flocculé et la structure du sol est très marquée (on dit parfois : très exprimée). Si, comme cela est souvent le cas, le sol est suffisamment riche en humus, la structure est grenue.

— L'humus calcique est très stable vis-à-vis des micro-organismes. Il s'accumule facilement, mais sa dégradation est lente : les plantes peuvent souffrir

d'une carence d'azote lorsque leurs besoins sont élevés, c'est-à-dire en période de croissance, même si la teneur en azote total du sol est élevée.

— Le pouvoir complexant des substances organiques hydrosolubles pour les oxydes et les hydrates de fer diminue quand la concentration en calcium du milieu augmente. De ce fait, en milieu riche en calcaire actif, la migration du fer ne peut avoir lieu.

— La présence de calcium et de magnésium dans le milieu dirige les néosynthèses d'argile, si elles ont lieu, vers la formation de montmorillonites ou d'illites.

— Dans les sols calcaires le pH est en relation avec la tension de CO_2 . Si le sol est humide et si les plantes et les micro-organismes sont à l'état vivant, il existe une tension de CO_2 qui peut atteindre près de cent fois celle de l'atmosphère : il se forme alors du bicarbonate et le pH s'abaisse à 7-7,5. Au contraire, la mesure de laboratoire sur un échantillon sec peut donner des valeurs de 8-8,5.

Certains éléments comme le phosphore et presque tous les oligo-éléments sauf le molybdène, sont sous des formes peu solubles (carences secondaires).

Le calcaire fin précipité par insolubilisation du bicarbonate peut contribuer à la formation des agrégats du sol en formant avec l'humus des pellicules concentriques autour des grains déjà existants. Ce phénomène contribue à augmenter la stabilité de la structure.

2. Les sols les plus typiques de cette classe sont les rendzines.

Profil de rendzine, Jura, J. Boulaine (1965)

Le long de la route de Thoirette à Matafelon (Jura méridional). Sur une terrasse de 30-40 m au-dessus de l'Ain. Végé-

tation : localement prairie, mais forêt calcicole. Mousses, pelouse, noisetier, fraisier.

0-19 cm : limon chocolat foncé à structure grenue très exprimée avec quelques faces anguleuses 3 mm \varnothing . Chevelu de racines très abondant. Quelques cailloux calcaires très anguleux ; certains sont des grès calcaires dont les grains ressortent sur la masse du caillou. Les éléments structuraux se détachent au moindre choc et roulent sur le bas du profil ;

19-43 cm : nombreux cailloux calcaires arrondis avec revêtement de matière organique brun et dessins en relief. Matrice brun-chocolat avec 30 % de fins graviers calcaires. Structure grenue anguleuse très exprimée 2 mm \varnothing . Quelques racines, surtout le long des gros cailloux ;

43-70 cm : cailloux roulés dans une matrice jaune foncé faite surtout de sables et graviers calcaires. Certains cailloux roulés, marneux, de couleur grise sont friables et se résolvent en lames esquilleuses. Racines exceptionnelles ;

70 cm et en dessous : terrasse ancienne de l'Ain. Cailloux roulés de calcaires et sables de plusieurs mètres d'épaisseur.

L'horizon 0-19 a un pH de 7,5 ; 1,6 % de calcaire, 9,9 % de matière organique, 43 % d'argile et un complexe absorbant de 58 me dont 49,3 de Ca et 5,7 de Mg. L'argile est de la montmorillonite presque exclusivement.

L'horizon 19-43 a un pH de 7,7 ; 33 % de calcaire, 6,45 de matière organique, 35 % d'argile et un complexe absorbant de 55,25 me, le C/N est de l'ordre de 13 pour les deux horizons.

Les variations autour de ce profil, dont la décarbonation en surface est déjà notable, sont dues, soit à l'existence d'horizons profonds variés, soit aux modifications des caractères de l'horizon de surface.

Dans les régions froides l'humus est moins bien mélangé aux éléments minéraux, plus grossier, le sol est moins profond, c'est un sol humique carbonaté. Dans les régions sèches la teneur en humus est plus faible, la structure est moins nette ; le sol est souvent appelé « xérorendzine ».

Des horizons peuvent se former sous l'horizon de surface ; horizons d'accumulation du calcaire

(classés avec les rendzines), horizons de couleur plus brune et de structure souvent moins grenue (sols bruns calcaires), horizons enrichis en composés du fer de couleur brune à rouille (sols bruns calcaires dégradés).

Sur la craie et sur les calcaires très fins, les rendzines peuvent être de couleur beaucoup plus blanche. Sur les calcaires durs et plus siliceux elles sont généralement plus argileuses, moins calcaires et plus rouges. Certaines peuvent n'être que d'anciens sols rouges recalcifiés par les pratiques culturales.

Les sols calcomagnésimorphes sont souvent carencés en azote malgré une bonne teneur en humus. Ils sont pauvres en phosphore, car cet élément s'y trouve précipité en phosphate de calcium insoluble et en oligo-éléments. La mise en valeur des sols de la Champagne pouilleuse, depuis 1945, a démontré l'importance d'une fumure bien équilibrée des rendzines formées sur une craie qui constitue une bonne réserve hydrique. Enfin les sols riches en sulfates de chaux présentent des carences potassiques.

IV. — Classes des vertisols

1. La notion de vertisol a été proposée en 1960 par les Américains pour regrouper de nombreux sols de régions chaudes assez humides à saison sèche qui étaient très difficiles à dénommer auparavant.

Les vertisols ont en commun une couleur assez sombre, parfois noire, due non pas à l'accumulation de la matière organique mais à une fixation de petites quantités de celle-ci sur l'argile par un phénomène dans lequel le type d'argile et le magnésium semblent jouer un rôle important.

La proportion d'argile est le plus souvent supérieure à 30 % et il s'agit en grande partie d'argile gonflante, généralement de la montmorillonite. Pendant les périodes sèches, le sol se fend et son horizon de surface prend une structure polyédrique fine. Les petits polyèdres tombent dans les fentes de retrait et quand le sol se réhumecte, l'apport de matière provoque après gonflement l'apparition de fortes pressions dans les horizons profonds. Ces pressions se traduisent par des déplacements des agrégats (d'où le nom de vertisol, dérivé de la racine *verto* : je tourne). Les agrégats des horizons profonds à structure large gardent la trace de ces glissements : leurs faces sont lustrées et striées (« slickensides »). En surface, les mouvements de gonflement peuvent amener la formation de bosses et de petites dépressions : microrelief « gilgai ».

Ces phénomènes entraînent une homogénéisation rapide du profil qui peut avoir de 50 cm à 2 m d'épaisseur.

Par contre, la compression des agrégats augmente leur densité et ils sont difficilement pénétrables par les petites racines. Celles-ci sont souvent brisées ou écrasées par les agrégats soumis aux pressions de gonflement. La végétation qui les recouvre est surtout saisonnière (graminées, composées) ; les arbres sont très rares.

Les vertisols sont plastiques et collants à l'état humide ; par contre à l'état sec leur structure superficielle est finement polyédrique (« self-mulching » ou auto-labour) ; leur capacité d'échange est élevée. Ils sont compacts et leur teneur en eau utilisable est faible pendant la saison sèche mais élevée en période humide ; les mouvements mécaniques dont ils sont le siège sont la cause de grandes difficultés pour les travaux de génie civil.

2. Les vertisols situés dans les bas-fonds sont les *vertisols topomorphes*. Leur formation peut être due à des processus variés : dans certains cas ils prennent naissance sur des alluvions ou sur des formations sédimentaires dont les argiles sont déjà originellement gonflantes. Elles peuvent alors provoquer les phénomènes successifs de gonflement et de rétraction qui sont à l'origine de la pédogenèse des vertisols. Dans d'autres cas la genèse de ce type de sol est due à une accumulation relative de cations bivalents : l'argilogenèse est alors orientée vers la formation d'argiles gonflantes (R. Maignien).

Profil de vertisols topomorphe, Maroc, J. Wilbert (1959)

Région de Louis-Gentil dans une large dépression évasée, sur alluvions datant de quelques millénaires.

- 0-4 cm : argile brun-gris très foncé, non calcaire ; meuble, en petites plaquettes dures à arêtes vives.
- 4-40 cm : argile brun-gris très foncé non calcaire ; horizon massif, fissures larges (3-4 cm) délimitant des prismes très grossiers qui se débitent en mottes prismatico-polyédriques moyennes, consistantes. Mottes poreuses. Cailloux siliceux roulés épars. Racines dans les mottes ;
- 40-80 cm : argile brun-gris très foncé un peu calcaire dans la masse ; horizon à structure prismatique très large, cohérent, fissuré verticalement (fissures moins larges), lentilles de glissement se débitant en mottes polyédriques fines à faces brillantes courbes non poreuses. Cailloux roulés épars. Racines dans les mottes ;
- 80-120 cm : argile brun-gris sur un fond jaune pâle en taches un peu calcaire dans la masse : horizon massif cohérent non fissuré ; loupes de glissement plus grandes qui se débitent en mottes compactes à faces brillantes courbes ;
- 120-150 cm : argile jaune pâle bigarré verticalement de brun, calcaire dans la masse ; horizon massif cohérent fondu pouvant donner des mottes à tendance polyédrique.

3. Sur certaines roche-mères basiques le bilan général des cations bivalents peut être le même,

mais pour des raisons différentes : c'est alors la vitesse de libération des cations et de la silice à partir des minéraux qui est plus rapide que leur exportation par drainage et il se forme aussi un vertisol. On dit alors qu'il s'agit d'un *vertisol lithomorphe*. Ce sont surtout les roches éruptives basiques, en particulier les basaltes, qui donnent naissance à ces derniers sols.

Profil de vertisol lithomorphe
Mexique, J. Boulaine (1964)

Sur basaltes quaternaires de la région de Tula. 100 km au nord de Mexico, forêt de chênes. P = 674 mm, T = 16,6°, altitude 2 030 m. Pluies en été, 6 mois de saison sèche en hiver.

0-3 cm : limon argileux noir à structure très fine polyédrique très exprimée, non calcaire ;

3-15 cm : limon argileux noir, structure nuciforme très exprimée, nombreuses racines, non calcaire ;

15-45 cm : argile noire en agrégats massifs limités par des plans de glissement à allure conchoïdale, non calcaire ;

45-85 cm : horizon de transition, beige foncé, limons et produits de désagrégation des basaltes ;

85-130 cm : minéraux des basaltes gris rosé avec boules de basalte de plusieurs décimètres cubes recouvertes de calcaire secondaire. Plaques de calcaire secondaire en surface de l'horizon et dans les fentes ;

En dessous de 130 cm : basalte non altéré sans revêtements calcaires.

La formation de calcaire secondaire et son accumulation dans le bas du profil mettent bien en évidence l'importance des cations bivalents dans la genèse du profil.

Les vertisols formés sur basalte sont souvent plus profonds que celui de notre exemple. En région méditerranéenne ils prennent une couleur marron clair (Syrie).

4. Les vertisols n'existent ni dans les régions froides et humides ni dans les régions équatoriales mais on les connaît sous des climats très variés à condition que les précipitations soient inférieures à 1 500 mm. Ils recouvrent de grandes étendues en zone méditerranéenne (Maroc, Andalousie), dans l'est de l'Australie, en Nouvelle-Calédonie, au Texas, en Californie, au Mexique, aux Indes et au Soudan.

Ce sont des sols souvent riches sur le plan chimique mais dont les propriétés physiques limitent les possibilités d'utilisation.

Quand l'horizon superficiel à structure fine est suffisamment épais, ils peuvent être très fertiles (sols noirs à coton). Par contre si la structure grossière et la forte compacité existent déjà près de la surface ils nécessitent de gros travaux d'aménagement avant d'être rendus utilisables (billons larges, ados très bombés, etc.).

V. — Classe des sols isohumiques

1. Les sols isohumiques ont une teneur très progressivement décroissante en matières organiques en profondeur ; mais cette teneur reste toujours notable, même dans les horizons profonds. C'est un humus calcique, riche en azote, riche en acides humiques gris d'origine essentiellement racinaire.

Les sols isohumiques existent sous des climats comportant une saison sèche, entre les 15^e et 45^e degrés de latitude. Leur végétation est à base de graminées, parfois d'arbustes. L'activité biologique y est intense (micro-organismes, petits rongeurs). Le calcaire peut migrer en profondeur, l'argile paraît plus stable ; cependant il est fréquent d'observer des horizons de surface plus pauvres en argile que les horizons sous-jacents. Cette accumu-

lation relative d'argile peut être le résultat d'une néogénèse plus intense, dans des horizons intermédiaires plus humides et plus chauds à certaines saisons que les horizons de surface.

2. Le plus célèbre des sols isohumiques est le chernozem, la fameuse terre noire d'Ukraine dont l'étude est à l'origine des travaux des premiers pédologues russes. Ils montrèrent qu'entre Kiev et la basse Volga, sous des climats à hivers froids progressivement plus secs, la teneur en humus des sols passe de 15 % (chernozem) à 4 % (sols châtaîns), à 2 % (sols bruns) et enfin à 1 % (sierozems).

La structure des horizons de surface, très grenue dans les premiers, devient polyédrique lorsque le climat est plus sec et que l'humus diminue. Le calcaire migre et s'accumule dans les horizons profonds du sol sous forme d'amas ou de nodules de couleur blanche. Dans les régions sèches, cette accumulation peut être importante mais elle est située dans des horizons proches de la surface. Dans les zones humides, elle est limitée à des nodules situés uniquement dans les horizons profonds.

Profil de chernozem épais

Ukraine, G. Aubert (1964) (Congrès international)

Koursk, zone plate doucement vallonnée. P = 550 mm. T = 7° (janvier — 8°, juillet + 20°). Sol gelé de novembre à avril (plus de 80 cm). Végétation de steppe.

- 0-5 cm : limon brun noir, non calcaire ; grenu moyen, bien structuré ; faible tendance lamellaire par place ; beaucoup de racines ;
- 5-17 cm : horizon analogue, un peu plus argileux, moins bien grenu ; très fortes traces de vers de terre ; très poreux ; très friable ;
- 17-37 cm : horizon brun noir, limoneux, nuciforme ; non calcaire ; friable, poreux ; traces importantes d'activité de la faune ; limite très irrégulière avec l'horizon suivant ;

- 37-70 cm : limon brun foncé avec éléments plus noirs remaniés par la faune ; structure polyédrique fine ;
70-100 cm : horizon brun limoneux à éléments de couleur beige ; non calcaire ; pénétration d'humus un peu plus foncé dans des canaux et tubulures ;
100 et plus : limon fin, beige ; calcaire en pseudo-mycéliums ; quelques petites poupées ; plaques d'accumulation du calcaire dans les fentes ; apports de matière organique dans des cavités dues à la faune.

La pédogenèse de ces sols est dominée par l'existence d'une végétation herbacée et par l'accumulation de l'humus due à un hiver froid pendant lequel le sol gèle souvent à plus d'un mètre et un été très sec malgré quelques orages dont l'influence pédogénétique est faible.

Dans les autres régions dont le climat présente une longue saison sèche et favorise le développement d'une végétation de steppe ou d'espèces arborées xérophytiques, on trouve des sols dont le profil rappelle ceux que nous venons de décrire. Par exemple aux Etats-Unis et au Canada. Là d'ailleurs, dans la Prairie, en milieu relativement humide, se forment des sols isohumiques partiellement désaturés en surface : les brunizems.

3. Ailleurs, dans les régions moins froides l'accumulation d'humus est moins forte et le sol présente une accumulation du calcaire plus superficielle.

Profil de chernozem châtain

Roumanie, VII^e Congrès international (1964)

Plaine du bas Danube, lèss bien drainé, cultures de céréales.
P = 480 mm, T = 10,6°, altitude 39 m.

- 0-5 cm : limon fin brun très foncé, nombreuses racines, friable, structure nuciforme non calcaire ;
15-42 cm : limon fin brun très foncé, structure grenue très développée, très nombreux granules coprogènes, nombreuses racines, peu calcaire, transition graduelle ;

- 42-68 cm : limon fin brun grisâtre très foncé, structure grenue grossière à polyédrique moyenne assez développée, nombreuses racines, croto vines et granules coprogènes, pseudomycéliums et nodules calcaires dans les anciennes croto vines, calcaire, transition graduelle ;
- 68-96 cm : limon brun foncé à brun, polyédrique à tendance primatique, calcaire ;
- 96-138 cm : limon fin brun foncé à brun, nodules calcaires ;
- 138-170 cm : limon fin brun olive massif, nodules calcaires ;
- 170-250 cm : lœss brun olive clair massif.

La teneur en argile décroît de 29 à 20 %, il y a 4 % d'humus en surface et 1,2 % à 80 cm. Le calcaire passe de 0 en surface à un maximum de 19 % à 150 cm et à 15 % dans le lœss primitif. La capacité d'échange saturée à 100 % à partir du A_1 comprend 75 à 80 % de Ca. Le sol est riche en phosphore et en potassium.

4. Mais c'est dans les régions de climat chaud que la définition et la classification des sols isohumiques posent le maximum de problèmes. L'existence d'une saison sèche prolongée et d'un hiver doux entraîne une plus faible accumulation d'humus — toujours de même type — parce que la quantité de matières organiques qui se forme annuellement est plus faible et leur dégradation plus rapide.

Quand la saison sèche est en hiver (hauts plateaux mexicains), le sol se rubéfie rarement et uniquement sur les roches acides. Lorsque la saison sèche se situe en été (régions méditerranéennes), la rubéfaction est beaucoup plus générale, mais elle ne paraît pas avoir lieu sur les roches riches en calcaire actif ou peu perméables. La libération du fer et son passage à l'état d'oxydes seraient en relation avec l'existence d'une phase pendant laquelle la teneur en calcium de la solution du sol est très faible.

L'accumulation du calcaire, dans certains horizons qui est un phénomène souvent ancien, prend, en outre, de l'importance sur le plan théorique des études pédologiques comme sur le plan pratique

des techniques humaines : la consolidation ultérieure de ces horizons donne naissance aux croûtes calcaires. Celles-ci jouent un rôle important dans la morphologie des paysages et sont un obstacle sérieux à la mise en culture des sols résiduels qui les recouvrent.

Profil de sol châtain subtropical

Algérie, J. Boulaine et J.-C. Lemoine (1965)

Plaine de Maghnia, alluvions soltaniennes postérieures à la dernière croûte calcaire. P = 380 mm, T = 17°. Culture d'orangers, terrain plat.

- 0-45 cm : limon sableux massif brun friable, gros labour de plantation d'orangers, motteux en surface, battance marquée par action des pluies et des arrosages, chevelu de racines ;
45-63 cm : limon sableux massif beige foncé, friable ; se résout à la main en petits éléments anguleux, petits nodules calcaires beiges de 5 mm, prismatique à l'état sec ;
63-87 cm : limon argileux beige foncé massif, nombreux nodules calcaires ;
87-107 cm : sable limoneux beige foncé massif, pénétrant par place dans l'horizon sous-jacent (traces de racines), nodules calcaires moins nombreux que dans le précédent ;
107 cm et en dessous : sable jaune massif friable.

La teneur en humus ne dépasse pas 1,5 % en surface, elle est de 0,8 entre 45 et 63 et de 0,50 en dessous. Le calcaire passe de 10,5 % en surface à 20,5, 19 et 11. La teneur en argile est de 35 % en surface et passe par un maximum de 42 % entre 63 et 87 cm.

Dans des zones plus sèches et plus chaudes (P = 300 mm, T = 20°), les sols de cette classe sont les sierozems. Ils ont une teneur en humus qui ne dépasse pas 1 %. L'horizon de surface est souvent compacté même lorsque le matériau primitif est une roche meuble. Ce phénomène est probablement dû aux chocs des gouttes de pluie et à l'existence d'un lacs de racines ou de rhizomes (*Poa bulbosa*) ; c'est ainsi que dans la pseudo-steppe syrienne le sol est tellement compact que les pluies d'hiver

ne s'infiltrant pas, permettant alors le développement de nombreux lichens.

Dans les régions tropicales semi-arides, sous une végétation de pseudo-steppes à épineux, se développent des sols isohumiques de faible teneur en matière organique et souvent rubéfiés : les sols bruns et brun-rouge subarides.

5. Les sols isohumiques sont souvent fertiles. Parfois le volume de terre disponible pour les cultures peut être limité par la présence d'une croûte calcaire. Certains, surtout les sols bruns et parfois les sols châtaîns, sont un peu trop compacts en profondeur et battants en surface (alcalisation). Leur utilisation nécessite le plus souvent leur irrigation ce qui les appauvrit très fréquemment en matières organiques et provoque alors la dégradation de leur structure.

VI. — Classe des sols podzolisés (sols évolués à humus grossier)

1. Dans les régions de température moyenne assez basse, souvent à hiver très froid, et de pluviosité assez élevée, sous forêts de conifères, parfois mêlés de feuillus, ou sous landes, les sols présentent en surface un horizon d'humus très grossier fréquemment surmonté d'une couche d'humus brut et en profondeur un horizon complexe enrichi en humus brun foncé bien lié à la matière minérale et en sesqui-oxydes de fer, ocre rouille, ainsi que d'alumine provenant de l'altération des minéraux originels et des argiles. Dans bien des cas, entre ces deux horizons, s'en trouve un gris cendré, à structure cendreuse, surtout constitué de silice et autres éléments résiduels. Ces sols constituent la classe des podzols ou sols à humus grossier (« mor ») et, parfois,

humus intermédiaire (« moder ») et à hydroxydes métalliques (de fer en particulier) individualisés.

Profil de podzol humo-ferrugineux
Bretagne, G. Aubert (1956)

Carrefour de La Croix-Cassée, route de Botmeur (Finistère). En pente moyenne (4 à 5 %) à la base de la colline de Saint-Michel-de-Brasparts sous lande à éricacées. P = 950 mm, T = 10° C.

- 0-12 cm : horizon brun noir d'humus brut ;
- 12-30 cm : horizon noir très humifère (humus grossier), caillouteux finement sableux à éléments grossiers très blanchis en surface ;
- 30-60 cm : horizon gris très clair, finement sablo-limoneux et caillouteux, à structure cendreuse ;
- 60-67 cm : horizon brun noir, très humifère, humus enrobant bien les particules minérales, limono-caillouteux ; assez compact ;
- à 67 cm : très forte accumulation d'oxyde de fer, rouille, durcie en plaquettes obliques (migration latérale) ;
- 67-75 cm : horizon ocre rouille assez foncé, limono-caillouteux ; peu structuré, assez massif à porosité faible ;
- 75-90 cm : horizon ocre beige de plus en plus clair, limono-caillouteux, peu structuré, assez friable ;
- au-dessous de 90 cm : le matériau originel, mélange de limon finement sableux et de graviers et cailloux de quartz et de grès : produits d'altération de la roche-mère : schistes gréseux et quartzites.

Teneur en matière organique 32 et 3,4 % en surface, 0,6 à 50 cm, 3,1 et 1,4 en dessous ; C/N 25 à 27 en surface ; pH 4,1 en surface, 4,75 en profondeur ; Fe libre/Fe total, 0,76 à 70 cm, 0,46 à 80 cm.

2. Dans cette classe sont également placés des sols qui ont tous les caractères fondamentaux des podzols et dont le type de genèse est très proche de celui des premiers mais dans lesquels l'entraînement des éléments, humus et oxydes de fer, est relativement peu poussé : l'horizon A₂ cendreuse ne s'y individualise pas. Ce sont les *sols ocres podzoliques* et les *sols crypto-podzoliques*.

Profil de sol ocre podzolique
Vosges, Ph. Duchaufour (1957)

Forêt communale de bruyères. Altitude 1 500 m,
P = 1 100 mm, T = 8° C. Sur 5 cm. Humus fibreux.

0-7 cm : gris foncé humifère, sableux, particulaire, transition assez nette.

7-14 cm : brun foncé, sableux, particulaire, transition assez nette ;

14-17 cm : brun-rouge foncé, sableux, particulaire, transition diffuse ;

17-39 cm : rouge jaunâtre, transition diffuse ;

à 39 cm : sableux, rouge jaunâtre.

Matière organique : 27 % en surface, 5,2 à 10 cm ; C/N de 24 à 20 ; fer libre 0,3 % à 10 cm, 0,6 à 20 cm, 0,2 à 50 cm ; pH 3,7-3,9 de 0 à 14 cm, 5,1 à 50 cm.

La dégradation des minéraux du matériau originel et des argiles qui constitue le processus essentiel de la podzolisation est due à des actions très complexes mais dans lesquelles l'humus brut et l'humus grossier des horizons supérieurs jouent un rôle fondamental. Par suite des conditions de climat, humide et assez froid, ainsi que de la pauvreté en bases des matériaux originels des podzols, la matière organique riche en lignine, en tanin et pauvre en azote provenant des débris de leur végétation (lande, conifères) évolue très lentement en un humus grossier, de rapport C/N élevé (18 à 25) riche en produits solubles ou facilement dispersables. Corps hydrosolubles stables en ce milieu humide et acide, et acides fulviques provoquent une libération des oxydes de fer, de manganèse et même d'alumine qui, individualisés ou en complexe organique, peuvent migrer. Ces corps humiques accélèrent la désaturation des argiles et acidifient le milieu, déjà originellement pauvre en bases, ce qui facilite encore cet entraînement. Par ailleurs, la présence des matières organiques très grossières et l'engorgement

par l'eau, souvent prolongé, des horizons supérieurs dûs à leur richesse en humus brut ou grossier y font apparaître des conditions réductrices qui favorisent encore la libération et l'entraînement des oxydes de fer et de manganèse. L'argile ne migre que faiblement en ces sols acides et pauvres en humus doux qui pourrait la maintenir dispersée en un tel milieu. L'accumulation en profondeur peut être due, dans certains cas, à la présence de bancs rocheux non encore décomposés (quartzites) ou d'une nappe phréatique ou d'une couche argileuse, constituant les unes comme les autres un niveau pratiquement imperméable. Le plus souvent elle est provoquée par des processus de dessiccation à l'intérieur du sol, surtout sous l'influence de la végétation qui s'y pourvoit en eau tout en laissant sur place une grande partie des éléments qui s'y trouvent dissous ou en pseudo-solution ou suspension. Elle peut l'être aussi par l'existence en profondeur de couches plus ou moins calcaires, de niveaux de la roche en cours d'altération et encore bien pourvus en bases — ou en hydroxydes métalliques — ou d'une nappe phréatique à teneur en bases plus élevée que dans les solutions du sol qu'elle imprègne. Des phénomènes de réoxydation — dans des niveaux plus grossiers d'un matériau sableux, par exemple — peuvent aussi provoquer l'accumulation d'abord des composés du fer et du manganèse, puis des autres corps entraînés. L'accumulation une fois commencée à un certain niveau tend à s'y poursuivre en se développant surtout vers le haut, au moins à partir d'un certain stade de maturité du sol, alors que la dégradation podzolique, débutant à l'horizon humifère progresse en descendant. Il existe parfois une zone intermédiaire du profil où ne se produit aucun des deux phénomènes.

Dans certains cas, action très poussée de dessiccation ou influence de nappe phréatique, l'horizon d'accumulation très riche en fer, durcit ; il se forme un « alios ». Ailleurs, sur sable, cet horizon se subdivise donnant naissance à des bandes ferrugineuses ou humo-ferrugineuses, parfois très nombreuses, formées par suite de percolations variables dans le temps ou par suite de l'existence de niveaux de compacité ou tassement différent dans un sable apparemment homogène.

3. La podzolisation se développe surtout sous climat tempéré froid et humide. En conditions continentales, elle peut être intense et l'horizon lessivé assez réduit ; en condition atlantique, celui-ci est le plus souvent très épais, même s'il n'est que faiblement cendreux. Dans ces derniers pays ce type de sols est aussi plus localisé sur certaines roche-mères. En zone tropicale très humide ou équatoriale, les podzols peuvent se former sur matériau sableux quartzeux très perméable et très pauvre en bases. L'accumulation y est parfois très concentrée dans les parties basses d'un « paysage » qui a perdu humus et fer sur toute sa surface. Ils existent aussi, quoique rarement, au sommet de l'horizon supérieur d'une ferrallite sénile (Congo).

Les sols de cette classe sont répartis en deux sous-classes. Dans l'une, le sol bien que parfois hydromorphe (pseudogley) ne subit pas l'action d'une nappe phréatique ; tandis que la présence constante de celle-ci caractérise l'autre sous-classe. La première comprend quatre groupes : Podzols à horizon cendreux bien développé ; Sols podzoliques où cet horizon est peu accentué ; Sols ocres podzoliques, où il n'apparaît plus, mais dans lesquels l'horizon de forte concentration ferrugineuse reste

très différencié ; Sols crypto-podzoliques, au profil beaucoup plus homogène, très riches en humus et autrefois classés parmi les rankers. Les sous-groupes sont définis en fonction du type d'accumulation et du développement éventuel d'un pseudogley.

Quoique généralement assez profonds — sauf ceux à alios — les podzols, très acides, à humus très grossier difficilement minéralisable, très pauvres chimiquement, et à très mauvaise structure, sont peu fertiles. Ils peuvent être utilisés pour des boisements mixtes de feuillus et conifères. Ces derniers, seuls, accroîtraient le processus de podzolisation. Les sols podzoliques à horizon cendreux peu accentué et les sols ocres podzoliques assez profonds peuvent, après amendement et parfois drainage, porter des cultures à enracinement profond, et, préférablement, permanentes. Les carences en oligo-éléments sont souvent à redouter ainsi que des phénomènes de toxicité par excès d'aluminium ou de manganèse soluble.

VII. — Classe des sols brunifiés (sols à humus doux ou mull)

1. Ces sols évoluent sous l'action d'une matière organique dont la décomposition est rapide. L'humus formé comporte en proportion limitée des composés insolubles qui complexent l'argile et forment des agrégats peu stables ; ils permettent parfois la migration de l'argile mais ce phénomène est limité par la minéralisation rapide de l'humus. Le fer est libéré sous forme d'hydroxydes mais ceux-ci ne se déshydratent jamais totalement. Le complexe argile-humus-fer donne au sol une couleur brune.

Tous ces sols se forment dans les régions tempérées ou dans des régions dans lesquelles la saison sèche n'est jamais très accusée. On distingue dans les

sols à humus doux deux grandes sous-classes : ceux à pédoclimat frais et humide (régions tempérées) et ceux à pédoclimat chaud et humide (zone tropicale).

La première sous-classe comprend deux groupes : les sols lessivés et les sols bruns.

2. Groupe des sols lessivés. — Ces sols sont soumis aussi au processus du lessivage, c'est-à-dire à la migration et à l'accumulation vers le bas du profil des colloïdes par voie uniquement physique. En milieu légèrement acide, et surtout en l'absence d'ion calcium, les composés humiques pseudo-solubles complexent les argiles enrichies en oxydes de fer et les maintiennent à l'état dispersé. Cette dernière action est d'autant plus efficace que l'argile est plus fine : les montmorillonites migrent les premières. En profondeur, il se forme un horizon d'accumulation B soit par déshydratation partielle des colloïdes, soit parce que l'humus protecteur est progressivement minéralisé par voie biologique, soit encore parce que la teneur en ions calcium augmente ou que le point isoélectrique est atteint. En sol lessivé acide ou plus ou moins hydromorphe les hydrates de fer peuvent aussi migrer indépendamment de l'argile.

Cet horizon B d'accumulation des sols lessivés a une structure polyédrique fine ou prismatique et les agrégats possèdent des enrobements d'argile fine qui sont orientés et parfaitement reconnaissables en lames minces au microscope polarisant. A l'œil, ils donnent un aspect luisant aux éléments structuraux du sol ; ils sont souvent de couleur plus foncée que l'intérieur des mottes.

On mesure le lessivage par l'indice d'entraînement : rapport du taux d'argile en B au taux d'argile en A_1 .

Dans les sols bruns lessivés l'indice est de 1,4 à 2 ; le A_2 est peu différencié mais l'horizon B est très bien exprimé, par sa structure et ses enrobements.

Profil de sol brun lessivé, Beauce, N. Fédoroff (1965)

Aunay-sous-Auneau (Eure-et-Loir). Bordure d'un vallon entaillant la surface de Beauce. Limon riche en quartz. P = 550 mm, T = 10,5°, altitude 150 m.

- 0-20 cm : limon brun, structure grumeleuse passant à une structure polyédrique fine, bien développée ; non compact ; quelques éclats de meulière ; nombreuses racines enserrant les agrégats ; non calcaire ; transition assez nette ;
- 20-50 cm : limon brun, structure polyédrique fine, très développée ; nombreuses racines ; non calcaire ; transition progressive ;
- 50-90 cm : limon brun, structure prismatique très bien développée ; peu de racines, mais nombreux conduits racinaires anciens ; non calcaire ; transition progressive ;
- 90-140 cm : limon brun foncé, structure prismatique grossière, peu développée ; nombreux revêtements argileux bien développés, brun ; nombreux conduits racinaires anciens ; non calcaire.

L'argile passe de 26 % en surface à 40 % en 50-140 ; il y a 3 % de M.O. en surface, 0,75 à 90 cm ; la capacité d'échange se maintient autour de 28 me, la saturation diminue de 97 % en surface à 91 % à 90 cm et le calcium fait plus de 90 % du total des bases. Le pH est de l'ordre de 8 (eau) et 7,4 (KCl).

3. Dans les sols lessivés typiques (ou modaux) le rapport de lessivage est compris entre 2 et 3, l'horizon A_2 est clair.

Profil de sol lessivé, région parisienne, N. Fédoroff (1965)

Dans la forêt de Marly. P = 604 mm, T = 10,5°. Pas de saison sèche. Végétation de hêtres avec quelques charmes. Roche-mère : lœss reposant sur des meulières en position plane.

- 0-7 cm : limon sableux brun très foncé, 7,5 YR 2/2 ; structure granulaire très peu développée ; pas d'éléments grossiers, nombreuses racines ;
- 7-21 cm : limon brun jaune, 10 YR 5/4 ; structure polyédrique moyennement développée, nombreuses racines ; transition progressive ;

- 21-65 cm : limon brun jaune clair, 10 YR 6/4 ; structure polyédrique bien développée ; racines assez nombreuses ; limite progressive et irrégulière ;
- 65-97 cm : limon argileux, brun jaune 10 YR 6/4 ; structure polyédrique moyenne à fine très bien développée ; revêtements argileux nombreux et visibles, brun 7,5 YR 4/4 ; taches noires nombreuses de l'ordre du mm, racines assez nombreuses, transition nette.
- 97-112 cm : limon analogue au C mais dont les fentes sont revêtues d'argile.
- 112-180 cm : limon brun très pâle : less reposant sur une meulière.

Ce sol n'est pas calcaire bien que le less contienne 16 % de CO_3Ca . La teneur en argile passe de 14 % en surface à 34 % à 65-97 ; le pH est inférieur à 4 dans tout le profil mais dépasse 7 dans le less. La teneur en matière organique atteint 6 % en surface ; moins de 1 % dès 21 cm. (Le pH des horizons supérieurs, anormalement bas, paraît être en liaison avec l'histoire de ce sol depuis une dizaine de siècles.)

Enfin les sols *lessivés faiblement podzoliques* ont un rapport de l'ordre de 3 et un horizon A_2 très blanchi.

Il existe encore des sols lessivés à lessivage oblique, sur les pentes et des sols lessivés hydromorphes. Dans ces derniers, l'accumulation d'argile a pour conséquence la formation d'un horizon profond peu perméable et la création d'une nappe perchée pendant les périodes humides. Ces sols font la transition avec les sols à pseudogley qui sont de vrais sols hydromorphes.

Les sols lessivés sont très répandus dans l'Europe de l'Ouest et dans les régions tempérées humides. Ils sont souvent très fertiles en particulier sur limon. Mais il faut parfois corriger leur acidité par le chaulage. La structure des horizons de surface est assez instable : ils ont une tendance au glaçage superficiel par suite de leur caractère battant.

L'existence en profondeur d'un horizon très argileux permet une bonne rétention de l'eau, parfois

excessive. Cet horizon B peut être relayé vers le bas par un horizon tassé compact (fragipan) que les racines pénètrent difficilement. Les engrais chimiques permettent de remonter le niveau de fertilité. Une grande partie des limons de plateaux de l'Europe occidentale dont la productivité est très élevée sont recouverts de sols de cette sous-classe.

4. **Groupe des sols bruns.** — Ces sols sont caractérisés par la formation du complexe argile-humus doux-hydroxydes de fer, sans lessivage notable de ce complexe. Ils se forment sous végétation forestière de feuillus ou prairiale, en position suffisamment drainée. La roche est riche en éléments fins ou en éléments calciques. Le climat est souvent de type continental assez peu humide ; si le climat est humide l'évaporation doit être sensible pour que les sols bruns se forment. Les caractères secondaires habituels des sols bruns sont une migration limitée de l'argile, l'apparition de quelques traces d'hydromorphie, et une profondeur faible du profil, à cause de la résistance de la roche-mère à l'altération. En d'autres cas le sol brun est riche en éléments calciques. Le pédoclimat étant assez chaud alors que le sol est encore humide, il peut devenir relativement riche en oxydes de fer. Il possède toujours en profondeur un horizon (B) différencié par sa structure ou sa couleur.

Profil de sol brun dit forestier (hydromorphe)
Normandie, G. Aubert

Louvagny (Calvados). Zone vallonnée. Pente faible. Prairie.
P = 750 mm, T = 11° C.

0 à 30 cm : horizon gris foncé très humifère, argilo-limoneux, humus bien lié à la matière minérale ; structure grumeleuse ; poreux ;

30 à 47 cm : horizon brun argileux ; structure polyédrique fine très nette ; bonne porosité d'ensemble ; traces de calcaire ; pas de revêtements argileux visibles sur les agrégats ; à 47 cm : passage progressif à une argile grise, compacte, de plus en plus calcaire en profondeur, avec des taches ferrugineuses, gris bleuté de réduction et ocre-rouille de réoxydation.

Matière organique : 4,5 % en surface, C/N = 11 ; argile 34 % à 10-15 cm ; 43 % à 25-35 cm ; 37,5 % à 80 cm ; pH de 7,5 à 8.

Des profils typiques de sols bruns peuvent aussi être observés sur limon en de nombreuses régions de France (Beauce, Normandie, etc.), analogues à celui du sol brun lessivé décrit précédemment, mais sans présenter de migration et d'accumulation d'argile. Sur produits d'altération de calcaire sableux enrichis de limon lœssique dans la même région que le profil ci-dessus (Magny-le-Campagne, Calvados) le sol est un peu plus profond A = 25 cm (B) = 35 cm. En pays plus méridional ils se développent sur calcaire sous une plus forte pluviométrie. Ainsi en Italie centrale (P = 1 600 mm, T = 11,5°) sous végétation de chênes, sur roche calcaire, le sol brun présente un horizon A brun foncé grumeleux de 45 cm puis un (B) de 30 cm d'un brun moins foncé, de même teneur en argile — environ 10 % — et de structure polyédrique assez grossière (F. Mancini, 1956). Il en existe aussi, souvent considérés comme peu évolués (« inceptisols » de la classification U.S.D.A.), sur roche acide à éléments fins, par exemple dans le Massif armoricain.

Profil de sol brun acide

Carhaix, Centre Finistère, G. Aubert (1956)

Zone vallonnée, pente moyenne à faible, sous pâture.
P = 750, T = 11°.

0 à 25 cm : horizon gris-brun, limon finement sableux, cailleuteux, grumeleux à nuciforme, poreux ;

25 à 33 cm : horizon brun, un peu plus argileux, polyédrique ;
33 à 45 cm : horizon légèrement plus ocre, mêlé de nombreux cailloux de schiste altéré de structure polyédrique moyenne ; poreux ;
à partir de 45 cm : schiste argileux finement sableux altéré.

Matière organique 7,2 % en surface, C/N : 9,5 à 10 ; argile, de 15 à 17,5 % ; pH 5,2 en surface, 4,6 à 60 cm ; fer libre/fer total : 0,31 à 0,42 %.

Grâce à un climat très tempéré et à une roche suffisamment pourvue en bases, les débris végétaux se décomposent assez vite en donnant un humus très doux, ce qui confère à l'horizon supérieur de ces sols une réaction normalement plus proche de la neutralité que celle du matériau originel, et une relative stabilité. En climat continental moyennement humide, la migration de certains éléments (bases, argile) en période pluvieuse est compensée par leur remontée ou leur blocage en saison sèche. En région plus méridionale la pluviosité faible ou l'évaporation plus accentuée ne provoquent qu'un entraînement limité. Sous climat atlantique ou plus ou moins humide, ce type de sol ne se développe que sur un matériau dont la finesse ou la richesse en bases — calcium surtout — diminue les possibilités de lessivage des colloïdes, ou, parfois, sur pente sur roche assez dure.

Ces sols bruns, présentant de bonnes propriétés physiques, peuvent porter de riches cultures de céréales lorsqu'ils sont suffisamment profonds et formés sur une roche assez bien équilibrée du point de vue chimique.

On rattache à cette classe certains sols bruns eutrophes formés en pays tropical humide à semi-humide sur roche calcique. Ils ont alors une structure cubique accentuée et une réaction voisine de la neutralité. Ce sont de très bons sols à coton.

VIII. — Classe des sols riches en sesquioxydes

1. Dans d'immenses régions du globe, essentiellement entre les tropiques et dans les zones à climat méditerranéen, de nombreux sols présentent des couleurs très accusées, allant du rouge au brun-rouge (Munsell, 10 R, 2,5 et 5 YR), plus rarement jaunes dès la surface ou au moins à faible profondeur. Ils sont particulièrement riches en sesquioxydes métalliques, surtout de fer, souvent aussi d'aluminium, de manganèse, etc. Il s'y trouve fréquemment des concrétions métalliques noires, rouges ou violettes, et des carapaces ou cuirasses de mêmes couleurs ou bigarrées plus ou moins durcies, et leurs produits de morcellement, blocs, cailloux et gravillons. Cette exceptionnelle richesse en sesquioxydes est due à une altération très poussée des minéraux des roches sous l'influence d'un pédoclimat suffisamment chaud et humide en même temps, au moins en profondeur, en présence d'une matière organique subissant une décomposition rapide. Ces processus peuvent être, en fonction des caractères du climat, mais aussi des autres facteurs d'évolution, plus ou moins poussés. Aussi a-t-on été amenés à différencier dans cette classe de sols trois sous-classes d'après la constitution des argiles et des éléments minéraux amorphes des sols ainsi que d'après les propriétés de leur complexe absorbant, exprimées dans leur profil par la succession des horizons, leur structure, etc.

2. Les sols rouges et bruns méditerranéens. — Ils possèdent un humus très évolué, présentant un C/N bas et un complexe argileux à base d'illite dominante et de kaolinite, avec parfois un peu de montmorillonite (sols bruns). Ils sont riches en

goëthite, ne comportent plus que des traces d'alumine libre, et des complexes fer-silice y ont été souvent décrits (Reifenberg). Leur réaction est normalement voisine de la neutralité (pH 6 à 7,5) dans tout l'ensemble du profil, leur saturation en bases (Ca, Mg) étant élevée. Ils présentent toujours en B une structure polyédrique moyenne à fine et souvent des revêtements argileux signes d'une accumulation d'argile.

Profil de sol rouge méditerranéen
Algérie, G. Aubert (1947)

Près de Tlemcen, sur calcaire dur dolomitique, anciennement sous forêt actuellement défrichée, sur pente moyenne (4-5 %).

0 à 30 cm : horizon brun rougeâtre, humifère grumeleux, nuciforme ; plus compact en profondeur ;

30 à 85 cm : horizon rouge argileux, structure polyédrique moyenne sans revêtements, mais très accusée ;

85 à 115 cm : horizon brun jaunâtre, très argileux, petites concrétions ferrugineuses très dures ; assez compact ;

115 à 150 cm : horizon jaunâtre, argileux, riche en gros nodules et amas de calcaire secondaire ;

à 1,50 m de profondeur, le calcaire dolomitique.

La teneur en argile passe de 38,8 % en surface à 46,1 % à 50 cm et à 33,7 % en profondeur (1,30 m). L'indice de lessivage du « fer libre » est de 0,7 (sans les concrétions). La teneur en calcaire est nulle jusqu'à 1,15 m, en dessous elle passe à 22 %.

Le profil de ces sols peut varier plus ou moins par rapport au type ci-dessus. Souvent l'horizon rouge argileux, plus ou moins remanié par le ruisellement, repose directement sur le calcaire dur ; ailleurs la roche-mère est un calcaire plus tendre, parfois gréseux. Ce type de sol peut aussi se former sur d'autres roches, riches en minéraux calciques, gneiss, schistes, etc. En quelques régions (sud-Portugal) il dérive du remaniement de sols fossiles eux-mêmes riches en sesquioxides. Il peut alors

être plus acide (pH 5,5 à 6). Dans les mêmes zones, un certain nombre de sols présente les mêmes caractères mais avec une couleur brune, probablement due à un degré plus poussé d'hydratation du matériau. On les observe surtout en position basse, ou sur une roche moins perméable ou lorsque le profil est soumis à des conditions de drainage imparfait.

La plupart des sols rouges ou bruns du bassin méditerranéen actuel sont fossiles. Par place, comme au Liban ou en certains points du Maroc (Atlas) ils peuvent être actuels ou subactuels, formés sous climat méditerranéen humide : hiver froid assez sec, été chaud et très sec, saisons humides (P : 600 ou 700 mm) peu prolongées. Au cours des saisons pluvieuses, les eaux qui drainent assez abondantes et chaudes provoquent, après une décomposition poussée de la matière végétale et la décarbonatation du matériau — produit d'altération de la roche-mère souvent enrichis d'éléments allochtones — une hydrolyse active des minéraux libérant les oxydes métalliques, surtout le fer. En saison chaude et sèche se produisent ensuite une remontée, surtout biotique, des bases, une déshydratation puis une pectisation limitée, en surface, des oxydes de fer, et un concrétionnement en profondeur des complexes fer-silice, et, parfois, du calcaire entraînés en saison humide. Ces sols peuvent être très fertiles. Cependant, ils manquent souvent de profondeur. Ils possèdent une bonne structure, suffisamment stable. Ils sont le plus généralement pauvres en azote et surtout en P_2O_5 « assimilable » ; une forte proportion de cet élément s'y trouve sous forme de phosphate de fer très peu soluble. Ils sont, en pratique, très sujets à l'érosion hydrique. Dans leur milieu ils sont bien adaptés aux cultures de plantes médicinales, d'arbres fruitiers, de vigne, parfois de primeurs.

3. **Les sols ferrugineux tropicaux.** — Ils possèdent de nombreux points communs avec les précédents. Ils sont en effet très riches en sesquioxydes de fer ou « fer libre », et leur matière organique est assez évoluée. Elle l'est cependant un peu moins que dans les « sols méditerranéens » (C/N : 15 à 17 au lieu de 12-13). Leur complexe absorbant est également moins saturé (en général 60 à 75 %) et sa fraction minérale comporte surtout, outre les oxydes de fer, de la kaolinite et des proportions variables d'illite. Son « évolution » peut donc être considérée comme plus poussée que celle des sols rouges méditerranéens. Certains d'entre eux contiennent cependant, en pays tropical, un peu de minéraux 2/1. Ils sont alors parfois dénommés : sols rouges tropicaux. Dans la plupart des sols ferrugineux tropicaux, le « fer libre » paraît migrer facilement et l'argile y est souvent lessivée ; les horizons appauvris prennent alors une structure assez massive, mal définie, possédant une compacité et une cohésion élevées. Ils subissent d'ailleurs, souvent, des périodes d'hydromorphie plus ou moins prolongées. Certains cependant, observés en particulier en Afrique méridionale et à Madagascar, présentent un profil beaucoup plus homogène. On leur donne parfois, alors, le nom de « sols fersiallitiques ». Les sols ferrugineux tropicaux se forment sous climat tropical semi-humide, et sous savane plus ou moins arbustive ou arborée, sur des roches très diverses, sables, grès, granite, gneiss, parfois basalte.

*Profil de sol ferrugineux tropical lessivé à concrétions
Macca, Sénégal, R. Maignien (1955)*

Sous savane arborée dégradée. P = 850 mm, T = 25°.

0 à 30 cm : horizon gris-brun foncé, sableux, peu structuré à éclats anguleux, tassé, cohérent ;

- 30 à 60 cm : horizon ocre beige, sableux, faiblement polyédrique plus ou moins émoussé, très cohérent ;
- 60 à 105 cm : horizon beige clair, sablo-argileux, structure à tendance polyédrique moyenne, forte cohésion, porosité tubulaire ;
- 105 à 145 cm : horizon blanchi à taches de pseudogley, nombreuses taches et concrétions noires, moyennement durcies, sablo-argileux, compact ;
- 145 à 165 cm : horizon très clair à nombreuses concrétions brunes à brun-noir, mangano-ferrugineuses, et taches plus ou moins diffuses, noires et rouges, dans une pâte assez blanche, argilo-sableuse ;
- au-dessous de 165 cm : horizon bariolé argilo-sableux à structure polyédrique passant progressivement au matériau originel, sable argileux assez ferrugineux et bariolé.

La teneur en argile passe de 8,25 % en surface à 15 % à 50 cm puis 28 % de 60 à 165 cm. La matière organique (1 %) a un C/N de 12,5 ; le pH est de 6,5 en surface.

Profil de sol ferrugineux tropical peu lessivé
Thiamène, Sénégal, G. Aubert (1947)

Sous savane claire (ancienne jachère). P = 600 mm, T = 27°.

- 0 à 40 cm : horizon gris brun humifère, puis gris-beige clair, sableux, monoparticulaire, friable, surtout sur les 17 premiers centimètres, plus foncés ;
- 40 à 70 cm : horizon rouge, sableux, mais massif cohérent un peu durci lorsque sec tout en restant assez poreux ;
- 70 à 110 cm : horizon de même type mais nettement plus friable ;
- à partir de 110 cm : passage au matériau originel, sable beige clair, net en dessous de 150 cm.

La pédogenèse de ces sols ferrugineux tropicaux est dominée par l'hydrolyse intense des minéraux de la roche pendant la saison des pluies où la température est élevée, ce qui provoque une importante libération des hydroxydes de fer, et par une dessiccation plus ou moins poussée de l'ensemble du profil et des produits de cette hydrolyse (formation de concrétions) pendant la saison sèche. Plus la

pluviosité du lieu est élevée, plus la « ferrugination » est forte et plus la migration en milieu acide des oxydes de fer et même de l'argile, grâce à la présence de produits humiques, est poussée. L'accumulation des éléments entraînés se produit en général à une profondeur assez limitée. Une certaine remontée de ces éléments, directe par capillarité ou indirecte par la végétation, a lieu lors des journées sèches de la saison des pluies et au début de la saison sèche. Les corps organiques hydrosolubles préhumiques peuvent aussi se condenser alors en composés humiques. Les sols ferrugineux tropicaux sont en général assez profonds (sauf en cas de concrétionnement excessif ou de présence d'horizon induré en carapace) et moyennement pourvus en bases. Ils sont le plus souvent déficients en P_2O_5 . Sauf certains, classés comme fersiallitiques ou rouges tropicaux, ils présentent de mauvaises propriétés physiques en surface. Ils sont très sensibles à l'érosion. Ils sont utilisés pour la culture du mil, du sorgho, de l'arachide, du manioc, du tabac, du sisal, parfois du cotonnier.

4. **Les sols ferrallitiques (1).** — En région tropicale, sous savane, le sol le plus fréquent est de type ferrugineux tropical ; sous forêt, c'est le plus souvent un sol ferrallitique, généralement bien plus profond, plus coloré (en rouge, jaune ou parfois brun), mieux structuré et plus friable, quand il n'est pas partiellement durci en carapace ou en cuirasse. Les sols ferrallitiques se forment par décomposition très rapide de la matière végétale qui se dépose chaque année sur leur surface (jusqu'à 15 t de matière

(1) Ces sols constituent maintenant une classe à part divisée en trois sous-classes d'après le degré de saturation du complexe (Commission de Pédologie et de Cartographie du sol, octobre 1966).

sèche par hectare en forêt dense), par altération très poussée des minéraux de leur roche-mère et par un très fort entraînement de certains des éléments bases et silice en particulier. Ils sont caractérisés par un profil A (B) C ou A B C dont les horizons présentent des passages assez progressifs, sauf parfois de A en B par suite de remaniements le plus souvent très locaux qui provoquent la formation entre ces deux horizons d'une nappe de graviers ou lit de cailloux. — La matière organique est très évoluée, riche en acides fulviques. Leur horizon B — dit « de concentration des sesquioxydes », ou « oxyque » — est riche en oxydes et hydroxydes de fer, aluminium, manganèse, titane, parfois de nickel, cobalt, etc. Les silicates argileux s'y trouvent sous forme de kaolinite et le rapport $\text{Si O}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y est inférieur ou au plus égal à 2. La capacité d'échange est très faible, — le plus souvent moins de 13 mé/100 g en (B) — et le degré de saturation en bases est très bas. La réaction est acide, parfois très acide. Les autres caractères sont une friabilité accentuée et souvent une bonne structuration — en pseudo-sable, en polyèdres fins, ou en poudre — de l'horizon B. Ils peuvent être lessivés en oxydes et en argile en A ; ils peuvent comporter en B une carapace ou une cuirasse. Evoluant en général depuis de nombreux siècles et même de nombreux millénaires, ils présentent souvent, dans leurs horizons supérieurs, les marques de remaniements mécaniques parfois très importants.

Exemple de sol ferrallitique

Dakpadou (Côte d'Ivoire), G. Aubert (1954)

P = 1 750 mm, T = environ 27°. Forêt dense peu dégradée, petit plateau à faible distance d'un vallon le drainant ; roche gneissique mésocrate. En surface un lit de feuilles, brindilles et branchages en voie de décomposition, comme posé sur le sol.

- 0 à 110 cm : horizon gris-brun un peu humifère jusqu'à 35 cm, puis beige, finement sablo-graveleux ; surtout dans les 40 à 50 premiers centimètres, concrétions ferrugineuses très dures, arrondies, très foncées. A partir de 80 cm environ, un peu plus compact, concrétions moins dures de teinte rouge brique ;
- 110 à 650 cm : à 110 cm, passage assez brusque à un horizon durci de concentration des sesquioxydes, carapace brisable à la main, en masses plus petites et plus dures ; se poursuit jusqu'à 175 cm, formé de bandes brunes à rouges plus ou moins foncées, s'anastomosant, délimitant des cavités remplies d'une masse terreuse, ocre beige ; à 175 cm, passe progressivement à un horizon non durci, friable, plus compact vers sa base, rouge brique, avec des taches nettement délimitées beiges, ocres ou grises ; encore quelques noyaux durcis, surtout dans la partie supérieure ; nombreux canalicules ; grains de quartz paraissant comme réduits en poudre, mais gardant leur forme ;
- 650 à 840 cm : argile tachetée très semblable à l'horizon précédent (passage très progressif, de 3,50 m à 6,50 m) mais taches moins nettement délimitées et une plus grande proportion de taches claires, beiges ou grises ; grains de quartz plus nombreux et non pulvérisés ; à sa base, quelques éléments blancs ayant la forme de cristaux de feldspaths, mais constitués d'une masse poudreuse ;
- 840 à plus de 1 150 cm : matériau originel constitué d'abord d'un matériau ocre brun, riche en quartz et en éléments blancs poudreux, de forme cristalline ; quelques cailloux de roche moins décomposée présentant des pyroxènes altérés, mais reconnaissables ; en dessous de 9 m, masse d'arène gneissique poudreuse, à nombreux éléments friables, de forme feldspathique, à grains de quartz et à éléments colorés très altérés. Plus profondément, vers 13 m, la roche, gneiss riche en minéraux ferro-magnésiens.

Les sols ferrallitiques se forment sous climat tropical humide (au moins 1 100 mm) et sous forêt dense. Une forte teneur de la roche en bases et minéraux ferrugineux et un bon drainage du profil et du paysage favorisent le développement de la ferrallitisation.

La décomposition de la matière végétale déposée à la surface du sol est rapide et très poussée ; très peu d'humus stable se forme, sauf dans les tout

premiers stades ou sur roches très riches en calcium. Les minéraux, même la kaolinite, présents s'altèrent très fortement et pendant les périodes de pluie les hydroxydes métalliques libérés — surtout de fer et d'aluminium — s'accumulent, la silice et les bases étant entraînées. En profondeur ces dernières sont reprises par la végétation, surtout en saison sèche ; elles sont ensuite redéposées à la surface du sol lors de la décomposition de la matière organique. Il peut s'y produire aussi un certain concrétionnement des oxydes, en particulier ceux de fer, surtout lorsque leur teneur dans ces horizons dépasse celle que leurs argiles peuvent adsorber (12 %). Au fur et à mesure de son évolution, le sol tend à s'acidifier par perte de bases et désaturation. L'alumine libre peut alors s'y trouver sous forme de gibbsite. En d'autres cas, dans les horizons profonds souvent mal drainés, elle peut se recombinaisonner à la silice et donner de nouvelles argiles kaoliniques. Parfois la silice s'accumule — meulière de néoformation — au niveau de l'argile tachetée ou en certains points du paysage. Lorsque l'acidification des horizons supérieurs est assez poussée, il se produit un lessivage des oxydes, et, parfois, en présence d'humus doux, de l'argile ; dans les cas extrêmes une certaine podzolisation avec apparition de complexes d'humus grossier et d'oxydes de fer a lieu.

Les variations des profils ferrallitiques portent sur la présence ou non de l'horizon d'argile tachetée, en profondeur, et surtout sur les caractères des horizons supérieurs ; présence possible d'horizons superficiels remaniés au-dessus d'un lit de graviers et cailloux ; lessivage en bases, sesquioxydes, argile ; teneur plus ou moins élevée en humus, en particulier sur roches riches en calcium ; durcissement de certains niveaux en carapace ou cuirasse. Elles sont

à la base de leur différenciation en divers groupes et sous-groupes. Les sols ferrallitiques forment des terres profondes, sauf s'ils possèdent près de la surface une cuirasse ou carapace ou s'y trouvent trop concrétionnés. Ils présentent de bonnes propriétés physiques, mais sont très acides, pauvres en bases, souvent dépourvus de P_2O_5 utilisable, et chimiquement déséquilibrés : excès de Mg, Al, Mn... carences en Mo, B..., etc. Ils sont parfaitement adaptés aux cultures arborées ou arbustives : hévéa, palmier, cocotier, cacaoyer, caféier, théier. Les cultures annuelles ou à faible enracinement y sont difficiles à réussir ; les sols risquent alors de s'éroder, s'indurer, perdre leurs bases, leur matière organique, leur structure. On y remédie, partiellement, par l'introduction d'une longue jachère, même arborée. Un bon équilibre cultures-élevage, permettant la rénovation des terres grâce à des soles de graminées — à enracinement profond et dense — et légumineuses est préférable lorsqu'il est possible.

5. **Cuirassement.** — En pays tropical suffisamment humide, la pédogenèse ferrugineuse, ferrallitique ou hydromorphe provoque une forte libération d'oxydes ou d'hydroxydes de fer, de manganèse, d'aluminium, etc. Accumulés en des horizons ou parties du paysage « privilégiés », ils peuvent durcir en carapaces ou cuirasses. Elles se forment en place en profondeur, ou après érosion — post-culturale — des horizons supérieurs ; après transport latéral et accumulation des éléments métalliques en bas de pente, fonds de vallée, bords de plateaux, etc. ; après colluvionnement ou alluvionnement en zones de rupture de pente ou dans les vallées. L'individualisation des éléments constitutifs se développe sur des millénaires ; érosion, durcis-

sement et parfois transport nécessitent quelques décades seulement. La formation de ces cuirasses (subactuelles) peut avoir commencé en des périodes passées et se poursuivre encore; elles sont souvent fossiles, remaniées par érosion et parfois durcies à nouveau. Elles ne se détruisent que très lentement et constituent un obstacle grave au développement de ces pays.

IX. — Classe des sols halomorphes

1. Des teneurs de quelques pour mille de sels solubles augmentent la pression osmotique de la solution du sol. Seuls des végétaux très spécialisés s'accommodent de ces conditions de nutrition (famille des salsolacées, etc.).

On exprime la teneur des sels solubles d'un sol par la conductivité de l'extrait de pâte saturée. Le sol est salin par définition si sa conductivité est supérieure à 4 mmhos/cm. Cette valeur correspond en pratique à un changement notable de la végétation. Pour certains elle paraît un peu trop basse.

Les sels solubles du sol sont surtout des chlorures, des sulfates et des carbonates de sodium, potassium, calcium et magnésium. Les plus fréquents sont le chlorure et le sulfate de sodium et le carbonate de sodium. Les premiers proviennent principalement de l'eau de mer dans les plaines littorales et de roches salines, le troisième est fréquent dans les bassins dominés par des roches éruptives à minéraux sodiques.

Le sodium, très mobile, peut se fixer sur le complexe argileux dont la structure se dégrade : sols à alcalis. En présence d'eau douce, comme c'est le cas après les pluies pour la surface du sol, l'argile sodique se dissocie, le pH dépasse 9 et il y a défloculation : l'horizon de surface est une boue fluante.

Par contre, en présence d'eau salée ou simplement lorsque le sol s'assèche et que la solution se concentre, les ions des sels solubles, très abondants, flocculent l'argile qui prend une structure très exprimée, prismatique à cubique dans les horizons profonds toujours un peu humides, micropolyédrique ou en poudre dans les horizons de surface plus secs. En été, cette argile flocculée peut se présenter en petits polyèdres dont la granulométrie est celle d'un sable. Le vent transporte ce pseudo-sable et l'accumule en bordure des zones salées pour former de véritables dunes d'argile, les lunettes.

La transformation des propriétés physiques des argiles, qui caractérise les argiles sodiques se produit pour une teneur en sodium, variable selon les cas mais souvent voisine de 15 % de la capacité d'échange. Certains auteurs pensent que le magnésium peut, parfois, avoir une action du même genre.

Les sols salés se forment, le plus souvent, dans les bas-fonds ou dans les plaines littorales dont le drainage est déficient souvent aux dépens d'une nappe phréatique. Ils sont plus fréquents dans les zones désertiques et sur leurs bordures, car l'évaporation intense permet la remontée des sels. La nature très particulière de la végétation permet souvent un diagnostic rapide : en Camargue, les plantes halophyles portent le nom d'« enganes ». Les zones plus salées sans végétation sont les « sansouires ».

2. Les sols riches en sels solubles portent parfois le nom de solontchak.

Profil de sol très salé à alcali
Algérie, J. Boulaine (1957)

Cuvette de Chantrit dans la plaine de Relizane (Algérie).
Pas de végétation. Profil observé en été. P = 325 mm, T = 18°,
5 mois de saison sèche, altitude : 40 m.

- 0-2 cm : argile brune à structure micropolyédrique ;
- 2-4 cm : argile brun-gris à structure micropolyédrique, avec des cristaux de $ClNa$ plus abondants vers la partie inférieure ;
- 4-5 cm : argile grise à structure polyédrique à tendance en plaquettes, avec dépôts salins en microcristaux ;
- 5-15 cm : la surface de cet horizon est parcourue de fentes de 0,5 à 1 cm, dessinant un réseau assez peu régulier formant des polygones de 5 à 10 cm de diamètre à surface convexe ;
- 15-45 cm : argile grise à structure feuilletée, avec des pseudomycéliums blancs à jaunes de chlorures et de sulfates. Assez humide ;
- 15-45 cm : argile bariolée gris rougeâtre à structure massive, humide et plastique. Nappe phréatique à 45 cm ;
- 45-100 cm : argile bleu-gris bariolée, très humide ; nappe phréatique très salée.

La teneur en Cl varie de 8 % en surface à 2 % en profondeur ; il y a un léger entraînement du calcaire de 17 à 25 %, les taux d'argile varient autour de 45 %. Le taux de sodium dans le complexe est de 5 %, sauf entre 15 et 60 cm, où il dépasse 15 %. Le pH ne dépasse pas 8.

Ce dernier sol est alimenté toute l'année en eau salée par une nappe phréatique proche de la surface et la remontée des sels par évaporation se produit tout l'été : c'est un solontchak vif. Si la nappe d'eau est plus basse ou n'existe pas, la remontée des sels n'a lieu que pendant le début de la saison sèche ; et ce n'est que par suite du manque de drainage ou grâce à des apports latéraux que le taux des sels peut se maintenir à un niveau élevé dans un tel sol. On l'appelle alors parfois solontchak mort.

Profil de sol à alcali à carbonate de soude
Mexique, J. Boulaine (1964)

Bassin fermé au nord de Zacatécas. P = 300 mm, T = 17°, alt. 2 000 m. *Sporobolus* sp. Saison sèche de huit mois.

- 3-0 cm : litière de tiges et feuilles mortes ;
- 0-20 cm : argile noire grumelleuse fine avec rhizomes et racines très nombreuses. La structure est un peu moins fine dans le bas de l'horizon ; moyennement calcaire ;

37-52 cm : argile grise cubique calcaire ; racines sur les faces des agrégats uniquement ;

52-80 cm : argile gris-olive clair ; massive à tendance lamellaire ; rares racines, moyennement calcaire.

En surface on trouve, entre les touffes de végétation, par plaques de quelques décimètres carrés, une mince croûte de carbonate de soude, marron foncé, de quelques millimètres d'épaisseur.

L'horizon B₂ est nettement plus calcaire que les autres ; le pH est de l'ordre de 9,5-10 dans tous les horizons.

Il existe enfin beaucoup de sols salés hydromorphes dans des marécages situés en bordure des étangs ou des lagunes salées.

On a pris l'habitude de classer les sols halomorphes en deux catégories : les sols salins proprement dits et ceux dont l'évolution est dominée par la dynamique du sodium, qu'ils aient été ou non précédemment riches en sels.

Solonetz et solods. — Dans de nombreuses régions du globe, souvent à saison sèche comme la Hongrie, l'Est australien, le Tchad, le sud des U.S.A., le Mexique, etc., certains sols à alcali très peu salés possèdent un horizon profond plus riche en argile que l'horizon supérieur et qui paraît s'être formé par migration puis accumulation de cette argile. Ces sols portent le nom de solonetz.

Profil de solonetz, Ipswich, Queensland, Australie
G. Aubert et G. D. Hubble (1955)

En zone plane, sous boisement couvert d'eucalyptus.

0 à 15 cm : horizon gris humifère, limono-sableux, faiblement grumeleux ;

15 à 35 cm : horizon plus clair, porosité due à la présence de petites cavités ;

35 à 60 cm : horizon gris-brun, argileux, à structure prismatique en larges colonnes à sommets bien arrondis ; quelques taches de pseudogley ; compact ; ligne plus blanche, irrégulière au sommet des colonnes ;

60 à 80 cm : horizon gris-beige, argilo-sableux, cubique large, compact et à larges taches ferrugineuses ocre-rouille ; en-dessous : limon sableux, gris-beige à larges taches et traînées ferrugineuses subhorizontales ocre-rouille.

Dans certains sols la ligne blanche irrégulière, festonnée très riche en silice peut être plus épaisse et constitue un véritable horizon. Ce sont alors des Solonetz solodisés, et des Solods.

Profil de solonetz solodisé

Gondey, Tchad, G. Bocquier et G. Aubert (1964)

Plaine très faiblement ondulée. Végétation irrégulière de savane très claire à *Combretum*, *Lannea*, *Anogeissus* et *Bauhinia* ; de larges plaques dénudées. P = 1 100 mm, T = 27,5° C.

- 0 à 3-10 cm : horizon de limite inférieure très irrégulière le long des sommets des colonnettes de l'horizon sous-jacent ; horizon gris clair à très petites taches rouilles ; finement sablo-limoneux ; massif à débit lamellaire formant croûte en surface, dès que sec ; assez poreux ; à sa base devient plus blanc, surtout en pénétrant jusqu'à 10 cm entre les colonnettes sous-jacentes ; s'y trouve plus vésiculaire ;
- 3-10 à 23 cm : horizon brun, argileux ; structure en colonnettes de 8 à 10 cm de large ; massif à débit cubique ; compact ; taches ferrugineuses ocre-rouille principalement sur les 2-3 premiers centimètres ; revêtements argileux brun foncé surtout dans la partie inférieure de l'horizon ; non calcaire ;
- 23 à 40 cm : horizon brun-gris avec quelques taches ocre-rouille ; limon un peu argileux ; à structure polyédrique moyenne à fine très nette, peu poreux ; quelques fines concrétions ferrugineuses ;
- 40 à 65 cm : horizon brun clair olive, argileux, non calcaire, polyédrique, compact, fines concrétions ferrugineuses ;
- 65 à 95 cm : horizon analogue, à taches grises ou jaunes ; pseudo-mycélium et nodules calcaires bien développés ; puis passage graduel au matériau argilo-sableux et taches de gley.

Argile de 17-18 % en surface à 44-46 % jusqu'à 95 cm puis 33 % ; pH 5,8 en surface, 8,7-8,8 en profondeur. Conductivité de 0,2 mmhos en surface à 0,7 à partir de 40 cm ; Na/T, 2 % en surface, 18 à 22 % en profondeur.

La formation des solonetz et solods a prêté et prête encore à de nombreuses discussions. Ils peuvent représenter d'anciens sols salés à alcali, dans lesquels, après lessivage très poussé des sels solubles, l'argile aurait migré et se serait accumulée en profondeur (solonetz) puis aurait pu être dégradée par hydrolyse en milieu sodique (solod). Il semble cependant que les solonetz et les solods se forment souvent dans un milieu pauvre en sels solubles, mais permettant, dès leur origine, l'enrichissement de leur complexe absorbant en sodium. L'argile sodique dispersée migre facilement, et, dans certaines conditions encore mal définies, subit une hydrolyse poussée qui la dégrade même s'il s'agit de kaolinite ; le matériau résiduel (horizon A₂) est essentiellement siliceux. Ce phénomène de « solodisation » est accéléré, semble-t-il, par une température élevée du milieu, comme c'est le cas pour la ferrallitisation (H. Paquet et G. Bocquier).

Il l'est aussi par la présence d'une nappe phréatique sodique. Il existe des solods formés sur un matériau sodique qui présentent une double solodisation : en surface sous l'influence des eaux de pluie ; à une certaine profondeur sous celle de la nappe (région de Fort-Archambault, sud du Tchad ; G. Bocquier).

La classification des sols halomorphes comporte deux sous-classes suivant que leur structure est dégradée ou non par le sodium ; la deuxième ne comprend qu'un seul groupe : les sols salins ; la première, trois : sols à alcali non lessivés, sols à alcali lessivés ou solonetz, sols à alcali à argile dégradée ou solods.

Utilisation. — Les sols halomorphes présentent de graves défauts quant à leur utilisation. Leur teneur élevée en sels solubles provoque une augmen-

tation de la pression osmotique de leur solution et limite la possibilité pour la végétation et les micro-organismes de s'y alimenter en eau. Certains ions présentent une toxicité particulièrement forte : magnésium, borates, fluorures. La présence des divers ions en excès constitue un danger de déséquilibre chimique. Leur action est particulièrement néfaste sur les bactéries du sol et des processus fondamentaux et indispensables pour le développement des végétaux, tels que la nitrification, sont alors inhibés. Le pH élevé de beaucoup de sols à alcali perturbe largement l'assimilabilité des oligo-éléments.

Dans le cas de la culture on peut remédier à ces défauts par submersion et drainage du sol et par l'apport des engrais appropriés (nitrate de Ca au lieu de sulfate d'ammonium).

Par ailleurs les mauvaises propriétés physiques des sols à alcali constituent aussi une gêne considérable pour la mise en culture d'autant plus qu'ils sont alors très sensibles à l'érosion. Leur amélioration se fait par apport de matériaux capables de réenrichir la solution du sol en ions Ca, gypse moulu par exemple. On peut réaliser cet apport par dissolution de ce sel dans l'eau d'irrigation utilisée sur ces sols (A. Ruellan). La pyrite, le soufre, l'acide sulfurique, le chlorure de chaux peuvent aussi être employés comme amendements des sols à alcali.

X. — Classe des sols hydromorphes

1. Les pédologues ont pris l'habitude de désigner par hydromorphie les phénomènes dus à un excès d'eau dans le sol. Les sols hydromorphes sont donc les sols dont la genèse est dominée par un excès d'eau, permanente ou temporaire, dans tout ou partie du profil.

Une telle définition prête à discussions : elles ne manquent pas. Il est en effet difficile de définir avec précision à partir de quel degré d'engorgement par l'eau un sol deviendra hydromorphe et beaucoup de sols déjà décrits comportent des sous-groupes hydromorphes : il existe des podzols hydromorphes, des solontchaks hydromorphes, etc. Nous dirons simplement qu'un sol est hydromorphe lorsque la formation d'un ou plusieurs de ses horizons a été déterminée par l'engorgement hydrique à un point tel que les caractères des autres classes ne sont plus reconnaissables.

L'existence d'eau en excès dans le sol entraîne un déficit d'aération. Les oxydations deviennent donc difficiles puisque l'oxygène ne circule plus à l'état gazeux mais le fait à l'état dissous dans l'eau, avec une vitesse bien moindre. Des phénomènes de réduction se produisent, permettant le passage de nombreux ions à l'état réduit. Le fer et le manganèse, en particulier, sont beaucoup plus solubles à l'état réduit. Ils migrent alors facilement soit à l'intérieur du profil pour se concentrer dans des concrétions ou des taches de couleur vive, soit à l'extérieur du profil, avec les eaux de drainage. Tous les sels solubles migrent aussi : il se forme notamment des encroûtements calcaires dans les sols dont la nappe est riche en carbonates. La matière organique, par contre n'est oxydée que très lentement et se transforme en un humus d'autant plus acide et stable que le déficit des bases sera plus grand.

L'engorgement peut être en relation avec une nappe phréatique dont le niveau par rapport au sol reste fixe ou au contraire varie en fonction des saisons. Cet engorgement peut être provoqué par la présence d'une couche imperméable en profondeur : ce sont alors les eaux de pluies qui, ne pouvant

pas traverser le profil forment une « nappe perchée » permanente ou saisonnière et s'accumulent dans les horizons profonds. Ceux-ci prennent alors un faciès particulier.

On appelle *Gley* (G) un horizon d'engorgement relativement prolongé où les phénomènes de réduction l'emportent sur les phénomènes d'oxydation ; le fer est réduit à l'état ferreux. Cet horizon est caractérisé par des teintes dominantes grises à verdâtre, ou bleutées de chroma égal ou inférieur à 2.

On appelle *pseudogley* (g) un horizon à engorgement périodique où se produit une alternance de réduction et oxydation avec redistribution du fer. Cet horizon est caractérisé par une alternance de taches ou bandes grisâtres, ocres ou rouilles.

On classe les sols hydromorphes suivant leurs caractères dus au type et à la durée de l'engorgement.

2. Si l'engorgement est général, permanent, et se produit jusqu'à la surface du sol, la matière organique reste à l'état de tourbe.

Suivant la proportion de bases on distingue des tourbes acides ou oligotrophes, ou tourbes hautes, et des tourbes basses, eutrophes et basiques.

Profil de tourbe oligotrophe
Vosges, P. Duchaufour (1957)

Tourbière du Beillard à 4 km de Gérardmer. Alluvions glaciaires siliceuses sur granite. P = 1 500 mm. Altitude 600 m. Sphaignes envahies localement dans les zones mieux drainées par une lande à éricacées.

0-30 cm : zone partiellement desséchée en été, structure granuleuse, morphologie rappelant celle d'un humus brut, couleur noire ;

30-100 cm : tourbe à *Sphagnum*, faiblement humifiée, fibreuse brun foncé, spongieuse et gorgée d'eau ;

1-2 m : tourbe à *Sphagnum*, plus foncée, plus décomposée, structure pulvérulente à l'état sec ;

Le pH moyen est de 3,7, la capacité d'échange est de 148 me, le taux de saturation est inférieur à 10 % en surface, de 3 % à 1 m, le C/N de 40, la matière organique représente 99 % du sol.

3. Si la nappe phréatique reste à quelques décimètres de la surface il se forme un sol hydromorphe à gley. On trouve les sols de ce type dans les zones déprimées, dans les vallées basses, sur les terrasses, et en bordure des nappes d'eau. Dans leur grande majorité, il s'agit donc de sols alluviaux qui peuvent présenter une hétérogénéité primaire du matériau, due aux conditions de dépôt de celui-ci. Ils sont souvent relativement jeunes et assez peu évolués. Les battements de la nappe permanente et sujette à des variations de niveaux, plus ou moins intenses, font qu'une certaine zone du sol est soumise à des alternances d'engorgement et d'aération. Le résultat est un départ du fer qui est évacué par les eaux de la nappe, et parfois même, si la matière organique est acide, un profil analogue au podzol (podzol à gley). Parfois, le sol est caractérisé par des horizons de surfaces très organiques et par la répartition du fer en taches qui donnent aux horizons profonds une allure bariolée (sols humiques à gley). En zone littorale ils sont riches en sulfure de fer. Souvent la teneur en matière organique est plus faible : seuls les horizons profonds subissent l'action de la nappe.

Si le climat est humide en permanence les sols à gley peuvent se former aussi sur des roches peu perméables.

Profil de sol à gley, Somerset, Angleterre, Avery (1955)

Série de *Long load.*, topographie plate, sur schistes argileux micacés en prairie permanente à *Agrostis* dominant. P = 700 mm, T = 10°.

- 0-10 cm : limon argileux brun-gris avec des taches rouilles le long des canaux des racines, structure motteuse grossière, friable et fissuré, racines abondantes, quelques trous de vers ;
- 10-18 cm : limon argileux olive-brun clair avec bariolures grises et brun-rouille, structure grenue non poreuse ; friable et fissuré, quelques racines ;
- 18-58 cm : argile gris clair avec beaucoup de taches ocre-jaune, et quelques concrétions rondes noires ; structure prismatique large avec faces gris clair et intérieur bariolé ocre, finement poreux et fissuré ; tenace et plastique ;
- 58-80 cm : limon argileux gris clair avec quelques bariolures brunes et jaunes, très nombreuses concrétions noires et brunes dures, quelques racines ;
- 80 et plus : limon argileux à structure lamellaire, fissuré horizontalement, de couleur alternativement gris clair et brun pâle, pas de racines.

Le pH varie de 5,3 en surface à 6,8 en profondeur, la teneur en argile est maxima entre 18 et 58, la capacité d'échange est de l'ordre de 20.

Certains sols à gley peuvent présenter en profondeur un horizon d'accumulation d'argile ou salé.

4. Si le climat est moins régulièrement humide, la végétation permet un assèchement et une réoxydation des horizons profonds du sol en été et le sol est dit à « pseudogley ». Un certain lessivage peut alors se produire dans les horizons de surface comme c'est le cas dans le profil suivant :

Profil de sol à pseudogley lessivé
Yvelines, N. Fédoroff (1965)

Carrefour Madame, en forêt de Saint-Arnoult, sud-ouest de Paris. Chênaie dégradée sur sables de Lozère recouverts de limons reposant sur les argiles à meulière du Chattien. P = 580 mm, T = 10,5°, altitude 150 m. Pas de saison sèche.

- 2-0 cm : litière très mince. Humus de type moder ;
- 0-2 cm : limon brun très sombre, structure polyédrique fine, très peu développée ; feutrage de racines ; non calcaire ; transition nette mais irrégulière, taches de A₁ jusque vers le milieu de l'horizon A₂ ;

- 2-12 cm : limon jaune-brun clair à taches ; structure polyédrique fine très peu développée ; racines abondantes ; non calcaire ; transition assez nette ;
- 12-22 cm : limon gris clair, à taches jaune-rouges, structure polyédrique très peu développée ; quelques concrétions noires friables ; racines assez nombreuses ; transition progressive ;
- 22-42 cm : limon légèrement argileux, rouge, jaune, structure polyédrique assez bien développée ; légèrement plastique ; taches à limites assez nettes de limon gris clair, à grains délavés ; nombreuses concrétions noires dans le limon argileux, quelques racines ; non calcaire ; transition assez nette ;
- 42-57 cm : limon argileux, bigarré, rouge, jaune et blanc ; structure polyédrique assez bien développée, peu compact, assez plastique, légèrement adhésif ; les racines tapissent les revêtements d'argile grise ; transition progressive ;
- 57-110 cm : argile limoneuse bigarrée, rouge, jaune et blanc ; structure à gros polyèdres ; assez compact ; plastique à l'état humide ; adhésif ; revêtement argileux blanc tapissé de racines ; quelques grains de quartz.
- au-delà de 110 cm : argile enrobant un sable siliceux, formé de grains de quartz et de débris de meulière, bigarrée, rouge, jaune et gris clair, quelques taches rouges ; revêtements moins importants et moins nombreux que dans l'horizon précédent.

Les sols hydromorphes tourbeux sont difficiles à utiliser même après drainage (acidité, déséquilibre chimique, matière organique). Dans les sols humiques à gley le drainage provoque une amélioration considérable s'ils sont calciques et non salés ; s'ils sont riches en sulfure de fer ils peuvent s'acidifier jusqu'à $\text{pH} < 2$ (acide sulfurique).

Les sols hydromorphes peu humifères peuvent être améliorés par drainage plus ou moins profond ou plus ou moins serré suivant qu'il s'agit de sol à gley ou à pseudogley. Dans le cas d'hydromorphie de surface on peut les utiliser après assainissement par aménagement de planches très bombées.

5. On peut étudier avec les sols hydromorphes les sols de rizières : ce sont des sols engorgés par l'eau en surface à la suite de leur culture avec des aménagements agricoles spéciaux. En quelques semaines il se forme sous la couche d'eau un profil qui comporte un horizon de surface oxydé, de un à trois centimètres d'épaisseur où diffuse l'oxygène de l'eau. En dessous apparaît un horizon réducteur dans lequel le fer peut être à l'état ferreux et les sulfates réduits en sulfures. La baisse de potentiel redox dans cette couche qui peut atteindre 20 ou 30 cm est telle que, dans certains cas les phosphates eux-mêmes sont réduits. Les micro-organismes, la fermentation des matières organiques et les racines du riz sont responsables, à des degrés divers de l'établissement de ces conditions réductrices. La manifestation la plus nette de cette évolution est une tendance du pH à se rapprocher de la neutralité. Parfois, en présence de sulfates, la couleur de cet horizon devient franchement noire par formation de sulfures de fer.

La nutrition du riz peut être affectée par ces conditions physico-chimiques particulières ; des maladies physiologiques diverses ont là leur origine. Elles se manifestent particulièrement lorsque l'éclairage est déficient. Elles peuvent être combattues par des apports de chaux, d'oxydes de fer et de bioxyde de manganèse.

TROISIÈME PARTIE

LES APPLICATIONS DE LA PÉDOLOGIE

CHAPITRE PREMIER

LA CARTOGRAPHIE DES SOLS

1. Pour définir un profil, un certain volume élémentaire de sol est nécessaire : c'est ce que les Américains ont appelé le « pédon ». C'est « le plus petit volume qui puisse être appelé un sol. Les dimensions latérales en sont suffisamment grandes pour permettre l'étude de la nature de tous les horizons... la surface varie de 1 à 10 m²... un pédon a trois dimensions. Il est grossièrement hexagonal » (*7th approximation* de la classification américaine)

Si l'on admet la réalité de l'existence du pédon, peut-on envisager celle d'une collection de pédons identiques et jointifs constituant sur la surface de la terre une zone bien définie, où le sol possède à peu près les mêmes caractères, avec des variations dont l'ampleur reste à préciser, que ceux d'un pédon type ?

En d'autres termes pouvons-nous passer de la définition d'un pédon en un point précis à celle d'une aire de sol dont les dimensions peuvent être considérables ?

C'est un des principes de base de la pédologie de postuler ce passage à la définition aréolaire du

sol. A la surface de la croûte terrestre, sur quelques hectares ou quelques kilomètres carrés dans les cas favorables, l'existence d'une roche-mère de caractères constants, d'un climat dont les variations sont insensibles, d'une durée d'évolution semblable pour tous les points de la surface, et d'actions biologiques ou topographiques du même ordre de grandeur fait que le sol est, en tout point de cette surface, identique, sauf variations négligeables, à un profil type. On peut donc extrapoler la connaissance d'un profil et penser que partout où les facteurs de formation ont été les mêmes le sol est, en fait, semblable à ce qu'il est au point où le profil a été étudié.

Réciproquement, si le pédologue peut définir une zone où les facteurs de formation sont identiques, il y a un maximum de probabilités pour affirmer que dans cette zone le sol présente, en tous points, des caractères semblables.

Cette position intellectuelle des pédologues s'appuie sur l'expérience de chacun. Expérience empirique des paysans qui dans tous les pays ont des termes spéciaux pour désigner des sols bien caractéristiques. Expérience scientifique des pédologues cartographes qui, dans les zones qu'ils étudient, peuvent prévoir la nature du sol en un point donné d'après les caractères de ses facteurs de formation.

2. L'aspect cartographique de l'étude du sol ne peut être séparé de son aspect local : l'étude du profil, quels que soient son détail et les moyens mis en œuvre, ne peut suffire à la connaissance du sol. Il faut en même temps étudier « le profil dans le paysage », c'est-à-dire le profil dans son contexte géologique, géomorphologique, topographique et dans son environnement biologique comme le

résultat d'une histoire souvent fort complexe

La cartographie des sols n'est donc pas à proprement parler une application de la pédologie mais, en fait, un aspect fondamental de cette science.

Il n'en reste pas moins que la connaissance de la répartition des sols avec une bonne précision reste une des applications les plus utiles de la pédologie. On peut même dire que c'est parce qu'ils voulaient connaître la répartition géographique des sols que les spécialistes de la science du sol ont été amenés à faire de la pédologie et à envisager le sol comme une formation naturelle. En effet on peut toujours définir, en un point précis, le sol comme l'ensemble d'un certain nombre de caractères analytiques (par exemple ceux qui sont utiles à l'agriculture), mais comment extrapoler en surface si la définition même du sol n'est pas faite en fonction des critères qui justifient et facilitent cette extrapolation ? Presque tous les chercheurs qui ont eu à cartographier l'objet-sol ont été amenés à concevoir le sol dans l'optique pédologique parce que c'était la seule qui leur donnait une logique pour tracer sur leurs cartes les contours des zones homogènes. Ce fut en particulier le cas de tous les spécialistes français qui au lendemain de la seconde guerre mondiale furent chargés des prospections nécessaires aux grands travaux de développement régional, soit outre-mer, soit quelques années plus tard en métropole même dans le cadre des sociétés d'économie mixte.

3. Même si le cartographe a une claire notion du sol « phénomène discontinu », il a encore à choisir entre deux solutions pour représenter sur ses cartes les unités qu'il va découper sur la surface à cartographier.

La première solution est analytique. Elle consiste à représenter, pour chaque zone homogène, un ou plusieurs caractères qui sont choisis du fait de leur valeur indicatrice. Par exemple, on représentera la texture du sol (très souvent par la couleur) et ses variations en fonction de la profondeur, la nature de la roche sous-jacente, l'hydromorphie, etc. (cartes des sols au 1/25 000 du département de l'Aisne, J. Hébert et coll.).

Ces cartes plurifactorielles exigent, dès que le nombre des caractères représentés dépasse deux ou trois, une complication du dessin qui rend leur lecture pour les non-initiés, et leur impression, assez difficiles. Par contre, elles ont l'avantage de représenter des caractères simples du sol qui sont connus de tous les usagers. On utilise beaucoup ces représentations analytiques pour les cartes à grande échelle destinées à des applications pratiques.

La seconde solution est synthétique. La zone cartographiée présumée homogène, est recouverte sur la carte par un seul signe (couleur ou figuré), elle peut porter un symbole graphique (numéro ou groupe de lettres ou de chiffres) et l'ensemble renvoie à une légende qui explicite l'ensemble des caractères, intimement liés, dont certains peuvent n'être qu'implicites, du « sol » qui, d'après le pédologue, existe dans la zone en question.

D'après la morphologie du sol-type, le pédologue définit les unités cartographiques par l'analyse des relations de la genèse du sol avec les différents facteurs de formation et contrôle ses conclusions par l'étude de nouveaux pédons.

Par approches successives, il parvient à dresser pour la zone étudiée, un catalogue d'unités cartographiques. Pour chaque unité une définition résume les caractères du profil-type et les variations pos-

sibles des principaux caractères du sol. Il dessine peu à peu sur sa carte les contours des zones correspondant à chaque unité.

Ce travail étant appuyé sur une bonne connaissance des facteurs de formation, donc des facteurs de différenciation des sols, il y a une grande probabilité pour que, à l'intérieur de chaque zone cartographiée, le sol soit bien homogène et ne présente que des variations mineures vis-à-vis du profil-type. On estime qu'une cartographie détaillée est valable lorsque plus de 85 % des surfaces de chaque unité correspondent à la description de la légende.

Si les unités cartographiques ainsi définies trouvent place dans la classification générale des sols, ce sont des unités génétiques. Mais il arrive que leurs caractères se rapprochent de plusieurs unités de la classification ; on en fait alors des unités d'apparentement, provisoirement rapprochées d'une certaine case de la classification sous bénéfice d'inventaire. Enfin les unités intergrades sont des unités intermédiaires entre deux unités actuellement définies de la classification.

4. Il n'est pas toujours possible de découper des unités homogènes. C'est le cas pour les cartes à petite échelle, et pour certaines zones où les caractères du sol présentent un gradient en relation avec un facteur de différenciation dont l'intensité varie rapidement. Exemple : les sols des pentes dont l'épaisseur peut varier en fonction de la pente, les sols hydromorphes en fonction de la profondeur de la nappe phréatique, etc. On utilise alors les unités complexes suivantes :

Une juxtaposition de sols est un ensemble de sols liés géographiquement. Chacun d'eux comporte une surface petite à l'échelle de la carte ; leur

coexistence ne paraît dépendre d'aucune règle de répartition précise.

Une séquence de sols est un ensemble de sols dont la succession se retrouve constamment dans un ordre déterminé, sans qu'il y ait de lien génétique apparent entre eux. La raison de leur juxtaposition régulière est l'influence prépondérante et régulièrement répétée d'un de leurs facteurs de formation.

Une chaîne de sols est un ensemble de sols liés génétiquement, chacun d'eux ayant reçu des autres, ou cédé aux autres, certains de ses éléments constituants.

Dans les conditions les plus favorables, la critique pédologique des profils et de leur environnement permet de définir une « série » de sol.

La *série* est « l'ensemble des sols qui présentent, sur un matériau originel de composition lithologique définie et dans des positions comparables dans le paysage, le même type de profil. Les profils des sols d'une série sont semblables non seulement par la succession, l'aspect et la constitution générale de leurs divers horizons, mais aussi par l'ordre de grandeur de l'épaisseur de chacun de ces derniers. Cet ordre de grandeur est envisagé en fonction de l'influence possible de la présence de chacun d'eux sur les propriétés générales des sols. La série est dénommée d'après le lieu où elle a été caractérisée. La définition de la série constitue l'étape préalable à son interprétation génétique » (1).

Les séries formées sur un même matériau constituent une famille d'un sous-groupe de sols.

La série est à la fois une unité cartographique et une unité de classification générale des sols.

(1) D'après la Commission de Pédologie et de Cartographie des sols, 1964.

Elle correspond à l'espèce des sciences biologiques. C'est en pratique l'unité de plus bas niveau de classification bien que l'on utilise parfois aussi le type et la phase pour tenir compte de la texture de l'horizon de surface et de l'action de l'homme.

5. Différents types de cartes. — La représentation des sols sur une carte varie beaucoup en fonction de l'échelle du fond topographique. Les cartes à petite échelle (1/10 000 000 à 1/250 000) ne peuvent être que des cartes de synthèse qui négligent de nombreux détails impossibles à figurer pour ne mentionner que les grands traits des caractères des sols.

La carte des sols du monde au 1/5 000 000 est en cours d'établissement. Elle existe déjà pour la plupart des continents. La collaboration internationale doit permettre d'établir une légende commune qui facilitera les comparaisons entre les futures éditions de ces cartes.

En France la carte au 1/1 000 000 est maintenant terminée (J. Dupuis). La carte au 1/250 000 est commencée.

Ces cartes ont surtout un but didactique et permettent de faire l'inventaire des grands problèmes concernant les sols. Elles permettent aussi les comparaisons de pays à pays. Elles ne peuvent être que synthétiques bien que des essais de cartes factorielles aient été faits (carte du pH au 1/1 000 000 de J. Franc de Ferrière).

Les cartes à moyenne échelle (1/200 000, 1/100 000, 1/50 000) réalisent l'inventaire des sols. Plusieurs essais de cartes au 1/100 000 sont en cours en France. Ce sont des cartes synthétiques sur lesquelles on arrive, dans les régions de structure simple, à représenter les séries et dans les autres,

les sous-groupes de sols. A cette échelle il faut déjà généraliser une fraction importante des surfaces et employer les unités complexes, juxtapositions, séquences et chaînes de sols.

Les cartes à grande échelle (1/25 000 et au-dessus) permettent de donner une image très précise des sols. Malheureusement leur prix de revient est élevé et il n'est guère possible d'envisager de les lever pour l'ensemble du territoire. On ne les dresse que dans les zones où les problèmes de mise en valeur justifient un effort important (zones d'action des compagnies d'aménagement régional, périmètres irrigables, régions très évoluées sur le plan technique, etc.).

Il arrive souvent que les utilisateurs primaires de ces cartes, ceux qui les financent, demandent qu'elles représentent la répartition de certains caractères du sol qu'ils ont besoin de connaître pour leurs projets. C'est ainsi que dans les périmètres irrigables, les maîtres d'œuvre demandent de préciser la profondeur et la capacité de rétention du sol ainsi que sa perméabilité, pour calculer les doses et le rythme des arrosages. Ailleurs on donnera beaucoup d'importance à la profondeur et à la texture du sol. Les pédologues qui font ces cartes de détail sont donc obligés de leur donner une présentation analytique. Mais pour tracer leurs contours ils utilisent presque toujours les notions de la pédologie, de sorte que ces cartes ne sont que des simplifications — au moment du dessin et de la mise en forme — d'une carte qui n'est souvent pas publiée mais qui est, elle, une carte synthétique.

Les types de représentation, les normes, varient suivant les organismes chargés de la cartographie. Les pédologues français travaillent actuellement

à codifier et à normaliser ces cartes pour que la lecture en soit plus facile à un profane.

On demande enfin très souvent aux pédologues d'interpréter les cartes pédologiques pour dresser des cartes qui, jadis, étaient appelées cartes de vocations des sols. En fait le pédologue ne peut pas dire quelles sont les cultures à faire sur un sol. Il ne doit pas le dire car il s'agit d'un problème dont les aspects techniques, économiques et politiques lui échappent. Par contre il peut faire, et il est souhaitable qu'il fasse, une carte d'aptitudes et de limitations culturales des sols.

Cette carte met en relief les facteurs favorables ou défavorables. Elle traduit, à l'usage des utilisateurs, les résultats de l'étude pédologique et comporte des renseignements sur l'épaisseur utile du sol, les réserves en eau, le stock d'éléments fertilisants, les carences, les toxicités, et, d'une manière générale, tout ce qui peut favoriser ou limiter la croissance des plantes cultivées.

Dans certains pays on fait aussi des cartes d'utilisation maximum des sols (« land utilisation maps ») qui définissent, dans l'état actuel de la technique agricole, les potentialités de chaque zone.

CHAPITRE II

PÉDOLOGIE ET TECHNIQUE AGRICOLE

1. Les agronomes sont les principaux utilisateurs de la pédologie, bien que les archéologues, les botanistes, les écologistes et les géologues ainsi que les architectes et les ingénieurs des Travaux publics, parmi beaucoup d'autres, aient aussi à bénéficier des études des pédologues.

L'agronome est intéressé en premier lieu par la définition pédologique de chaque unité de sol et de son profil. Sa caractérisation depuis la surface jusqu'à la roche pratiquement inaltérée lui permet de connaître dans son état actuel le milieu dans lequel ses cultures pourront développer l'ensemble de leurs racines et prélever l'essentiel de leurs aliments. Parmi les éléments du profil, il faut alors observer avec soin la texture et la structure de chacun des horizons, la répartition de la matière organique ainsi que son aspect qui renseigne sur sa nature et sur son type d'évolution, tous éléments déjà notés dans l'étude du « profil cultural » selon la méthode mise au point par S. Henin. La profondeur du sol présente une importance capitale pour le cultivateur ; elle n'est cependant pas toujours la même que celle de la « terre » explorée par les racines. Une rendzine, par exemple, est toujours peu épaisse. Formée sur un calcaire dur comme en Berry elle n'offre qu'un faible volume aux racines des plantes ; sur une craie, au contraire, grâce à la

fois aux propriétés mêmes de cette roche et à l'absence de solution de continuité entre elle et le sol, les racines disposeront en pratique d'un volume de matériau utilisable beaucoup plus grand, et l'eau mise à la disposition des cultures sera retenue non seulement dans le sol proprement dit mais aussi dans les couches supérieures plus ou moins altérées de la craie poreuse. Il n'en est pas de même si une « grève », formée de petits graviers arrondis ou émoussés, est intercalée entre la rendzine et la craie. Par contre dans un sol ferrallitique très concrétionné, très profond, les racines peuvent n'avoir à leur disposition qu'un faible volume si les concrétions y sont trop abondantes. Le passage plus ou moins brutal ou graduel d'un horizon à un autre influe également sur le développement des racines et donc des cultures elles-mêmes. Dans son étude du sol le pédologue décrit avec précision tous ces caractères.

2. Il cherche également à définir les processus qui ont donné naissance au sol. Tout au long de cette démarche il travaille encore pour l'agronome. Savoir par exemple que le sol qu'il utilise comporte à 50 ou 60 cm de profondeur un horizon plus riche en argile que ceux qui le surmontent ou qui lui servent de soubassement ne peut lui suffire ; il lui importe aussi de savoir comment il s'est formé. Une telle disposition du profil peut s'observer dans un sol lessivé à mull comme dans un sol châtain des régions méditerranéennes. L'observation de revêtements sur les agrégats de l'horizon argileux ou leur absence, l'étude précise de la répartition et de la nature des sables des divers horizons, et, le cas échéant, de plaques minces de ceux-ci, permettent au pédologue de reconnaître que dans le premier

cas il s'est formé par lessivage des horizons supérieurs et accumulation d'argile en profondeur, dans le second par argilification préférentielle en profondeur. Cela signifie que les bilans hydriques et les mouvements des solutions sont très différents dans les deux sols.

Le pédologue pourra aussi, par exemple, devant l'enrichissement d'un horizon profond du sol en amas, granules ou nodules calcaires, en déduire ou l'existence d'un engorgement temporaire provoquant une hydromorphie du sol, ou l'effet de processus d'entraînement responsables d'une accumulation ultérieure en profondeur. Dans l'un ou l'autre cas, l'utilisation agricole du sol sera différente. Dans un sol ferrallitique, la présence de sesquioxydes métalliques libres, de fer, d'aluminium, en quantité importante, même par comparaison à sa roche-mère, et l'évolution très poussée de ses constituants minéraux, permettent de reconnaître que les phénomènes d'hydrolyse y sont très intenses — si par ailleurs l'étude du sol dans son paysage et par rapport à ses facteurs de formation amène à les considérer comme actuels — et que, par conséquent, le dosage des éléments échangeables ou des éléments assimilables est insuffisant pour estimer la quantité d'aliments mis par le sol à la disposition des cultures ; il faut aussi doser sa « réserve minérale ».

Les processus d'hydrolyse, de dissolution, d'entraînement par lessivage puis d'accumulation en profondeur dont le pédologue observe facilement les effets dans les profils de sols qu'il étudie sont aussi d'une grande importance dans la dynamique des oligo-éléments qui constituent l'un des facteurs essentiels de leur fertilité. Des études comme celles réalisées à ce point de vue par les pédologues dans les Costières du Gard, au sud de Nîmes, ont eu déjà des répercussions extrêmement heureuses sur la mise en valeur de ces sols.

3. Le pédologue pour comprendre et définir le sol est amené à utiliser tous les aspects de la science

du sol : étude morphologique, étude chimique, étude physique, étude biologique ; mais à la suite de ce travail analytique, il fait la synthèse de ces résultats partiels, et c'est d'elle surtout, sous sa forme explicative, que l'agronome a besoin.

Une difficulté importante subsiste dans cette transmission au second des résultats obtenus par le premier : elle a trait aux échelles de temps, c'est-à-dire à l'âge du sol et à la durée des processus qui l'ont formé. Les processus pédologiques, en effet, sont lents et nécessitent de nombreuses années pour provoquer des modifications importantes du sol ; les phénomènes dont le cultivateur cherche à tirer profit sont au contraire, à l'échelle des jours, des mois, au plus de l'année. L'agronome doit cependant tenir compte aussi de l'évolution du sol et de sa fertilité au cours des rotations pluri-annuelles et même de leur succession... ou au cours de la vie des arbres de ses vergers ou de ses forêts. La conservation de cette fertilité ne peut s'envisager qu'au long de nombreuses années. Par ailleurs, si l'altération hydrolytique des minéraux sous l'action d'un climat même chaud et humide est un phénomène très lent, d'autres processus pédogénétiques tels que le lessivage du calcaire ou même de l'argile, la transformation d'un horizon par hydro-morphie, sa « tirsification », sont beaucoup plus rapides et ne demandent que quelques années pour faire apparaître leurs effets ; de nombreuses études en cases lysimétriques l'ont prouvé. L'âge du sol et le caractère actuel ou fossile des processus qui lui ont donné naissance sont rarement faciles à définir. Cependant le pédologue, plus que tout autre, en s'appuyant sur une connaissance géomorphologique du terrain, peut définir ce qui est « héritage » d'un passé révolu, selon la terminologie de B. Gèze ;

ce qui est le résultat d'une évolution débutée au cours du quaternaire par exemple, mais qui se continue encore maintenant dans le même sens, comme dans certains sols isohumiques étudiés par A. Ruellan au Maroc ; ce qui est dû à une évolution actuelle d'origine récente. La comparaison des sols rouges des divers pays du tour de la Méditerranée, telle qu'on peut la tenter après les travaux de si nombreux géographes, géologues et pédologues est très instructive à cet égard.

En résumé l'étude pédologique, si longue et difficile soit-elle, apportant une définition précise, synthétique et explicative de chaque sol, et caractérisant chacun de ses éléments constitutifs dans son existence actuelle et dans son mode et son époque d'apparition, fournit à l'utilisateur agronome, forestier ou cultivateur sur l'état du sol et sur sa dynamique toutes les données dont il a besoin.

4. La définition pédologique d'un sol présente un intérêt particulier pour l'agronome lorsqu'il s'agit de transposer dans d'autres zones les méthodes culturales qui ont pu donner de bons résultats en un point. Des effets comparables ne sont obtenus que si les sols sont tout à fait identiques. Une définition relativement simple des sols peut parfois suffire s'ils se trouvent dans une même zone écologique ; déjà en ce cas une étude pédologique complète est préférable, intégrant tous les caractères édaphiques pouvant influencer sur les cultures. Elle est indispensable si l'extrapolation envisagée doit se faire entre des points éloignés. Cette règle est spécialement importante quand il s'agit d'utiliser dans la pratique courante les résultats obtenus dans les centres de recherches agronomiques et dans les stations agricoles expérimentales. Aussi la

carte pédologique de ces stations doit-elle être toujours dressée avec suffisamment de précision, à une échelle de l'ordre de 1/10 000 par exemple. Cette définition pédologique des sols est aussi l'un des documents indispensables pour la mise en valeur des zones d'aménagement où une agriculture particulièrement intensive, souvent à base de méthodes ou de procédés nouveaux, doit être installée. En général, la carte pédologique est alors complétée par la carte d'aptitudes culturales qui n'est, en fait, qu'une expression plus proche de l'application, de la première. Elle reste aussi indispensable pour établir la planification agricole d'une région ; prévoir celle-ci sans d'abord connaître les caractéristiques des sols à utiliser et la répartition de chacun des types qui s'y trouvent est actuellement impensable. Il serait illusoire sans cela d'essayer d'y appliquer les méthodes culturales les plus perfectionnées. Dans certains pays, les cartes dressées dans ce but représentent la répartition des « formations superficielles » ou bien encore des unités de « paysages ». Dans les deux cas les informations sont insuffisantes ; dans le premier, parce qu'elles ne donnent qu'une vue comme figée du sol, sans en faire intervenir la dynamique ; dans le second, parce que trop synthétiques, elles manquent de précision sur les caractères morphologiques des sols eux-mêmes et sur la répartition exacte de chaque type particulier. Seul l'ensemble de la carte pédologique des sols et de la carte de leurs aptitudes culturales (ou toute autre carte analogue) peut constituer le document précis et complet recherché. L'échelle de la carte doit être choisie en fonction du but à atteindre ; habituellement le 1/100 000 peut suffire en vue d'une planification régionale, mais, dans le cas d'un secteur de mise en valeur, il faut atteindre

le 1/20 000 pour ce qui est des zones de cultures pluviales et le 1/10 000 pour ce qui est des zones de culture irriguée ou nécessitant de gros travaux, de drainage par exemple. L'échelle du 1/5 000 est parfois utilisée pour des études très précises ou en cas de répartition particulièrement complexe des sols ; plus rarement le 1/2 000.

En France, où les études pédologiques ne se sont développées cependant que depuis peu, de tels travaux ont pris une grande extension du fait, en particulier, de la création des compagnies régionales d'aménagement, et de l'extension des programmes de mise en valeur menés par le Génie Rural. Pour coordonner leurs efforts, les pédologues qui s'y adonnent, qu'ils appartiennent aux sections pédologiques de ces compagnies, à l'I.N.R.A., aux centres pédologiques du C.N.R.S. ou à certains bureaux d'étude ou aux Ecoles Nationales Supérieures d'Agronomie se sont groupés en un comité : le G.E.P.P.A. (1) où ils retrouvent ceux qui effectuent des travaux analogues outre-mer, pédologues de l'O.R.S.T.O.M. en particulier.

L'établissement de cartes de sols aussi détaillées exige un très grand nombre d'observations de profils de sols complets et d'analyses. Cela demande du temps et revient cher, d'autant que la formation d'un ingénieur pédologue ou d'un chercheur en pédologie est très longue et très coûteuse.

En bien des cas il est possible de charger de ces cartographies, qui ne correspondent pour une large part qu'à un travail de routine, des équipes de prospecteurs sous la conduite d'un pédologue qui puisse définir les divers types de sols, préciser leurs caractères les plus importants pour la reconnaissance et pour l'utilisation agricole et souligner les problèmes essentiels de leur mise en valeur.

On peut aussi accroître la précision de ces cartes, et diminuer le temps nécessaire à leur établissement, en utilisant la photo aérienne, non seulement comme document de fond pour le travail de terrain, mais aussi, après interprétation, pour définir certaines unités physiographiques qui possèdent une signification pédologique et pour préciser leur répartition exacte.

(1) G.E.P.P.A. : Groupe d'étude des problèmes de pédologie appliquée.

La mise en valeur d'une région est une opération longue et difficile où agronomes et pédologues doivent collaborer étroitement durant des années.

Pendant l'établissement de la carte pédologique, il faut installer des points d'essai sur certains sols de fertilité convenable afin de vérifier la possibilité de réaliser les cultures envisagées. Lorsque les principaux types de sols à utiliser ont été définis, il faut délimiter des champs expérimentaux afin de choisir les espèces à cultiver et les engrais les mieux adaptés à chaque sol. Enfin, les cartes pédologiques et d'aptitudes culturales établies, il faut installer un secteur pilote et une station expérimentale. On mettra au point, dans le premier, à l'échelle normale de la culture, les rotations et les techniques prévues dans le plan de mise en valeur. Dans la seconde, on poursuivra des recherches agronomiques indispensables au développement agricole ininterrompu de la région et à l'étude de l'évolution des sols au cours des années, sous les divers types de cultures.

Certaines de ces opérations peuvent être économisées dans des pays développés comme la France. Elles ont été, déjà, réalisées par les organismes en place depuis longtemps. Le pédologue apporte sa connaissance globale du sol et il aide l'agronome chargé de l'utiliser. Leur but commun est la conservation et même l'augmentation du potentiel productif.

CHAPITRE III

LES SOLS ET L'HISTOIRE DE LA BIOSPHERE

1. Si la connaissance des sols et de leur processus d'évolution intéresse les agronomes qui étudient les phénomènes actuels, elle permet aussi de mieux saisir certains aspects de l'histoire géologique de notre globe.

Certaines synthèses de l'histoire géologique du globe supposent l'existence primitive d'une croûte terrestre très basique, constituée de matériaux qui sont en moyenne, actuellement à plusieurs kilomètres de profondeur : le Sima. Ces matériaux constituent encore le fond des grands océans et percent parfois les terrains qui les recouvrent pour venir s'épancher en surface. Les basaltes des volcans sont les témoins de ce magma profond. A l'origine encore les océans auraient été acides et l'atmosphère plus riche en gaz carbonique qu'actuellement. Les eaux de pluie très acides devaient donc altérer très vite les roches basiques. Mais comme la vie n'avait pas encore apparu sur la terre, tous les processus pédologiques liés à la matière organique étaient absents de ces pédogenèses anciennes.

La décomposition des roches primitives devait avoir pour résultat, dès le début des temps géologiques, la formation d'une phase migratrice riche en cations, qui parvenait aux océans avec les eaux de ruissellement et d'une phase résiduelle composée de minéraux les plus résistants et probablement d'argiles de synthèse. Déjà dans le cadre de ces hypothèses, les phénomènes superficiels devaient

avoir un rôle considérable dans la formation de la zone plus acide de l'écorce terrestre, le Sial.

Dans la couche superficielle qui n'était pas protégée contre l'érosion par un manteau végétal, se faisait déjà la séparation des éléments solubles entraînés dans les océans et des résidus insolubles, quartz et silicates phylliteux, dont le transport dans les zones de sédimentation a permis la formation des premières roches sédimentaires.

« Le métamorphisme, au moins partiel, de ces matériaux et les apports de la montée de fumerolles, amenant des profondeurs des éléments légers chassés par leur déficit gravitationnel, ont fixé ceux-ci de préférence dans les masses sédimentaires finement divisées... C'est ainsi que s'édifia le Sial primitif » (H. et G. Termier, *Glyptogenèse*).

2. Mais les phénomènes d'altération superficielle ont peut-être joué un autre rôle, combien important, puisqu'il devait permettre l'apparition de la vie sur la terre.

On sait que bien des auteurs situent l'apparition de la vie dans les eaux marines. Une autre hypothèse suppose que la vie aurait pris naissance dans les colloïdes. En effet la zone d'altération superficielle, où peuvent prendre naissance des colloïdes silicatés est, semble-t-il, un milieu physico-chimique plus favorable que l'eau de mer. L'action des rayons ultraviolets sur les radicaux libres serait responsable de l'apparition des premières molécules vivantes. L'étude des sols pédologiquement jeunes des régions équatoriales perpétuellement humides montre que ces sols sont constitués de gels colloïdaux qui n'ont jamais subi de déshydratation. Serait-ce au sein de semblables gels de silice et d'alumine que s'est réalisée la première synthèse de colloïdes carbonés organisés ensuite en êtres vivants ?

3. L'apparition de la vie a profondément modifié les conditions de la genèse des sols. Les organismes

ont acquis sur les minéraux un pouvoir d'attaque dont l'étude commence à peine mais dont on sait déjà qu'il permet des vitesses et des intensités d'altérations pratiquement impossibles en l'absence de vie.

L'existence de ciments organiques entre les constituants minéraux du sol a permis la formation de structures plus stables, donc une durée plus grande des périodes d'altération et la dégradation lente de l'énergie chimique fixée par la fonction chlorophyllienne a entretenu cette altération. Le manteau végétal a protégé la couche superficielle contre l'érosion accélérée, provoquant la formation de sols épais où l'attaque des produits les plus résistants a pu se faire à la longue bien que la vitesse des réactions soit très lente.

A partir du Cambrien nos informations sur le rôle des phénomènes pédologiques dans l'évolution géologique du globe sont suffisantes pour que se mêle à nos hypothèses une part de plus en plus grande de raisonnement étayé sur des faits. C'est Erhart qui de façon particulièrement nette a montré dans de nombreux cas que la nature des sédiments déposés dans les mers est en relation étroite avec le type de pédogenèse régnant sur les continents voisins.

L'histoire des temps géologiques comporte une succession de cycles de surrection et d'érosion de chaînes de montagnes.

Pendant les longues périodes de calme qui séparent les crises tectoniques, les roches sont recouvertes par des sols fréquemment épais et très évolués. Sous forêt et sous climat intertropical, l'épaisseur du sol et surtout des horizons C dans lesquels se fait le début de l'altération de la roche peut dépasser plusieurs mètres. Or pendant de très longues périodes géologiques le climat de la terre a été plus chaud

que le climat actuel. Les climats froids sont des exceptions limitées (fin du Primaire et Quaternaire).

Pendant la plus grande partie des temps géologiques, les continents ont donc été couverts d'une végétation dense, exubérante, protégeant le sol contre l'érosion accélérée et permettant l'altération rapide des roches. Les résidus insolubles de cette altération demeuraient sur place, tandis que les produits solubles étaient entraînés par les eaux jusque dans les océans dont ils modifiaient peu à peu la composition. Lorsque les taux critiques étaient atteints, ils précipitaient. Bien souvent, la simple augmentation de leur teneur permettait la prolifération d'organismes qui concentraient dans leur squelette certains composés comme les carbonates et les phosphates. Ces organismes, morts, s'accumulaient sur les fonds pour former lentement les sédiments organogènes.

Puis, brusquement, un changement de climat, une phase orogénique ou toute autre raison détruisait le manteau superficiel continental. Les résidus solides envahissaient alors les zones de sédimentation.

Il se formait des roches détritiques constituées par divers éléments du squelette minéral des sols classés après transport (grès et pélites), par des argiles héritées de la pédogenèse, et par des composés concentrés dans les sols (oxydes métalliques, concrétions calcaires ou autres). L'érosion accélérée des roches elles-mêmes apportait ensuite des galets, des sables ou des éléments fins dans les zones de sédimentation. H. Erhart a donné le nom de *biostase* à ces périodes de prédominance des phénomènes biologiques et il a appelé *rhexistase* les périodes de crise durant lesquelles l'érosion accélérée était le phénomène dominant de l'évolution des reliefs et des modes de sédimentation.

La formation des sédiments était beaucoup plus rapide dans les périodes de rhexistasie puisque leurs éléments constitutifs avaient été fabriqués et stockés durant les périodes de biostasie. Le transport d'éléments solides peut accumuler des masses beaucoup plus grandes que le transport par voie chimique.

Même pendant les périodes de rhexistasie, le transport à la mer des produits de l'érosion se fait peu à peu, avec des relais continentaux. L'altération pédologique se poursuit durant l'existence temporaire des dépôts alluviaux ou éoliens et les matériaux qui arrivent dans les zones de sédimentation sont soit très résistants (sables quartzeux et minéraux lourds), soit très fins (argiles), soit solubles. L'oscillation du niveau marin permet même à certains sédiments déposés à faible profondeur de participer à un nouveau cycle d'altération pendant les émergences. C'est ainsi que les dépôts quaternaires de la Manche et de la mer du Nord ont probablement donné naissance au cours de la régression wurmienne à une partie du *löss* qui recouvre actuellement le nord de l'Europe.

Au total, ce sont les produits fins, limons et argiles formés dans les sols, et les produits solubles de l'altération des roches qui, pendant de très longues périodes géologiques, ont concouru à la formation lente des sédiments déposés dans les mers épicontinentales et leurs bordures océaniques.

Les phénomènes étudiés par les pédologues sont encore responsables de la transformation des sédiments sur les fonds marins. La pédologie sous-marine est un domaine peu exploré mais certainement fort intéressant et dont les résultats permettraient de comprendre de nombreux phénomènes géologiques : diagenèses, topographie du plateau continental, formation des pétroles, etc.

Mais si l'étude des sols éclaire d'une lumière parfois nouvelle certains aspects de l'histoire du globe, son intérêt n'est pas moindre pour l'histoire des hommes.

CHAPITRE IV

LES SOLS, L'ÉROSION ET LES CIVILISATIONS

1. L'humanité a longtemps vécu en familles ou tribus, du produit de la pêche, de la chasse ou de la cueillette. Mais vers la fin du Mésolithique, les hommes inventèrent un nouvel art d'utiliser les ressources de la nature : l'agriculture. Ils se formèrent alors en nations composées d'une majorité de paysans qui travaillèrent à produire des récoltes au profit d'une minorité privilégiée.

Seuls, quelques groupes humains vécurent sans bases agronomiques : les pirates du XVI^e siècle ou les Mongols. C'étaient des prédateurs, vivant aux dépens des populations fixées. Ils ont rapidement disparu ou se sont développés à partir d'une base agricole.

La plupart des civilisations ont donc eu un support agronomique, c'est-à-dire un type d'organisation du milieu biologique au profit de l'homme.

Or la qualité des sols oriente, modifie, influence la nature des civilisations. Les sols, par leur carence ou par leur toxicité, contribuent à donner aux groupes humains une physiologie particulière. Il y a des types humains de pays acides, d'autres de pays calcaires ; des réflexes de pays secs et des mentalités liées aux sols riches en matières orga-

niques. Certaines maladies, on le sait, sont graves ou bénignes suivant les zones climatiques : peut-être les différences de nutrition liées aux sols en sont-elles en partie responsables ?

Certains sols ont obligé les hommes à travailler ensemble. Les sols lourds, argileux, réclament des attelages de plusieurs paires de bœufs, donc la mise en commun des animaux de plusieurs familles. Les sols marécageux doivent être drainés par des canaux que seules les communautés puissantes peuvent construire. Il en est de même pour irriguer les terres. Les civilisations de l'Égypte, de la Mésopotamie ou des Pays-Bas sont nées de ces travaux communautaires.

D'autres sols favorisent l'individualisme, l'esprit d'indépendance. La grande variété des sols français est, peut-être, une des causes de notre faculté d'adaptation. Les steppes ou les forêts tropicales sont des régions qui ont aussi façonné des esprits individualistes mais plus fatalistes ou plus respectueux des tabous que les nôtres.

2. Par contre, les civilisations ont profondément modifié les sols : elles ont remplacé les végétaux primitifs par des végétaux cultivés, modifié la structure du sol (labours), sa topographie (nivellement), le micro-climat (brise-vents, modification du couvert du sol), exporté avec les récoltes une partie des éléments nutritifs du sol, créé une nouvelle dynamique des sols.

Dans certaines régions cultivées depuis longtemps, de trois à quatre mille ans en Chine et en région méditerranéenne, mille à deux mille ans en Europe de l'Ouest, la persistance et l'augmentation des rendements de l'activité agricole démontrent que ce bilan est positif.

Les régions tempérées et les régions froides et humides où la dégradation de l'humus est lente, ont vu se développer des civilisations agraires en expansion. L'Europe septentrionale, la Chine du Nord, sont parmi les rares régions du monde où la production sur l'ensemble du territoire a augmenté et augmente encore. La zone de l'Ouest des grands lacs américains est un autre exemple de zone privilégiée. Dans les deltas d'Extrême-Orient et les basses plaines méditerranéennes l'activité de l'homme maintient l'état de production par l'irrigation, le drainage et l'apport de matières organiques, mais aux dépens des terres qui les entourent et qui sont trop souvent dégradées.

Presque partout ailleurs, dans le monde, on assiste ou on a assisté à des diminutions spectaculaires du potentiel agricole à la suite de l'exploitation intensive des sols.

En Mésopotamie, en Amérique centrale, l'histoire nous apprend, des régions actuellement désertiques ont été jadis prospères ; les systèmes agraires utilisés par les peuples de ces régions ont épuisé ou détruit le capital naturel, au point d'entraîner la mort des civilisations elles-mêmes (Mayas).

De même, l'Iran et les régions qui l'entourent ont été le siège d'empires considérables... Actuellement, l'état du sol ne permettrait pas de reconstituer les cultures qui existaient jadis ; l'érosion du sol entraîne un ruissellement tellement rapide sur les montagnes que, même remis en état, les canaux d'irrigation ne serviraient à rien car les ressources hydrauliques sont détruites. Au Cambodge, la brillante civilisation kmer occupait des régions actuellement abandonnées par l'homme.

Beaucoup de civilisations primitives ont employé le feu pour détruire la végétation : cette technique entraîne une mobilisation rapide d'éléments fertilisants et permet des récoltes momentanément intéressantes. Sa contrepartie est un lessivage accéléré du sol, surtout en climat humide, et une érosion généralisée. Les sols des régions tropicales semi-humides gardent les traces indélébiles de ces techniques encore trop répandues.

Mais les labours et la monoculture suffisent parfois à déclencher l'érosion des sols.

Aux U.S.A., 100 millions d'hectares ont été gravement affectés dans le Middle-West en deux siècles. À Madagascar, en une dizaine de siècles, la seule action de l'homme a beaucoup diminué la surface cultivable. Au Brésil, dans l'Etat de São Paulo, on cultive le café et le coton depuis le début du XIX^e siècle ; la culture dure une vingtaine d'années puis, les sols épuisés et en proie à l'érosion, on cultive plus loin vers l'Ouest. Le résultat actuel est que sur 250 000 ha utilisables, 170 000 sont très dégradés. En Ukraine la steppe a été mise en culture après l'abolition du servage. Mais la dégradation a été si intense et si rapide qu'elle imposa en 1945 des mesures de conservation du sol.

3. Les techniques agricoles doivent permettre avant tout de conserver le capital naturel constitué en grande partie par « le sol », formation naturelle qui résulte d'un processus lent et prolongé : il faut des dizaines de siècles pour former un sol à partir d'une roche dure ; une argile friable met de nombreuses années pour porter une maigre végétation ; la plupart des limons alluviaux qui sont en fait des sols transportés par des rivières, sont eux-mêmes difficiles à cultiver les premières années.

En érodant le sol, en modifiant le régime d'écoulement des eaux, en supprimant par le feu ou par l'intermédiaire des animaux le couvert végétal, l'homme est un facteur d'évolution rapide du milieu. Et à partir du XX^e siècle, la puissance technique de l'homme est devenue considérable.

Nous vivons une période de l'histoire de l'humanité où se conjuguent l'augmentation du nombre des hommes, l'augmentation de leurs besoins, et l'augmentation de leur pouvoir d'exploitation de la nature.

Le taux d'accroissement actuel de l'humanité est de 1,67 % (pour certains pays, il arrive à 2,5 %).

On prévoit 31 milliards d'êtres humains en 2100 contre 3,4 milliards en 1964.

Un tel accroissement de la population du monde pourrait amener à envisager une limitation des naissances. Une telle solution ne laisse pas cependant de soulever de graves problèmes et des objections sur bien des plans.

Mais l'augmentation du nombre des hommes coïncide en outre avec l'augmentation de leurs besoins. L'état actuel de l'agriculture est tel que 60 % des hommes ont faim ; or les progrès de l'information entraînent l'évolution des esprits ; ces hommes mal nourris demandent des conditions de vie meilleures et ceux qui ont déjà un niveau de vie correct cherchent à l'améliorer encore. Il en résulte une augmentation des besoins parfois masqués artificiellement par les déficiences de la distribution et de la répartition du revenu. A l'échelle du globe il n'y a jamais de surproduction agricole mais sous-consommation et plus encore « mauvaise répartition ».

Par contre la civilisation matérielle moderne permet à l'homme une exploitation beaucoup plus poussée du milieu naturel.

Dans le domaine de l'agriculture, la multiplication des machines, l'usage de certains engrais, l'approfondissement des labours, etc., permettent d'extraire d'un même sol beaucoup plus de matière végétale (calculée par exemple en unités fourragères à l'hectare). Les sols s'épuisent plus vite qu'avant si on ne leur restitue pas tout ce qui est enlevé et sont plus sensibles soit à l'érosion (ameublissement), soit à l'hydromorphie (tassage, excès d'irrigation), soit à des modifications de nature (salure). Mais d'autres aspects de l'activité humaine retentissent aussi sur les équilibres naturels.

— Alors que jadis une partie de la production végétale servait à la nourriture des animaux de trait et revenait au sol sous forme de fumier, les moteurs actuels permettent l'utilisation de l'énergie chimique ou électrique (camions, tracteurs, machines diverses) et l'exportation définitive d'une bien plus grande proportion de matière végétale.

— Les multiples combustions de l'industrie et des moteurs tendent à augmenter la teneur en CO_2 de l'air, ce qui augmente sa perméabilité aux infrarouges (réchauffement actuel du climat ?).

— Les grands travaux (Suez-Panama), les transports modernes, permettent la pénétration rapide des faunes et des flores (algues, crabes, etc.).

— Les défrichements de forêts et les mises en culture modifient la température du sol.

— Les travaux d'art, barrage-réservoir, drainage, modifient le poids des zones continentales et peuvent précipiter certains effets tectoniques.

4. En face de tous ces problèmes, de toutes ces possibilités et de toutes ces exigences du monde, les agronomies sont acculées à se repenser : les agronomies traditionnelles parce qu'elles ont à se convertir à l'emploi des méthodes et des machines modernes, comme l'Inde, la Chine et la plupart des pays sous-développés ; les pays d'agronomie extensive où la grandeur des surfaces permettait jusqu'ici de glaner le revenu du sol sans se préoccuper de la conservation ou de l'augmentation du capital productif, comme certaines zones du Canada, de l'Argentine ou du Brésil ; les agronomies perfectionnées de l'Europe occidentale ou des pays méditerranéens car les dimensions et le cadre humain des exploitations ne sont plus à la mesure des moyens techniques de production et de commercialisation. C'est pour cela que se multiplient les organismes de mise en valeur, les « Authorities » des Américains (T.V.A.), les Sociétés d'Aménagement en France, la « Casa del Mezzogiorno » en Italie, les « Terres vierges » des Russes, les « Plans » espagnols,

la « Nouvelle province » des Égyptiens, les périmètres irrigables, les zones d'organisation rurale, etc. Tous ces organismes prennent comme base de leurs aménagements des études pédologiques.

Certes les ressources potentielles du globe terrestre sont encore considérables dans le domaine agricole. La mise en valeur rationnelle des terres actuellement connues, la mise en culture des sols encore vierges ou recouverts de forêts et de steppes à faible productivité permettraient de nourrir correctement une population notablement plus importante que la population actuelle du globe. Les reconnaissances pédologiques menées depuis vingt ans dans le monde entier sont une base solide pour l'affirmer.

Mais le progrès agricole est très lent dans la plupart des pays que nous connaissons, alors que la dégradation par l'érosion ou par l'épuisement chimique sont des phénomènes accélérés. Même si les crédits et les efforts considérables consacrés actuellement à des investissements non productifs étaient virés à des travaux d'équipement, cette dégradation ne pourrait être arrêtée rapidement.

Il semble d'autre part difficile que la vitesse d'accroissement de la production agricole puisse augmenter sensiblement.

Les contraintes à cette augmentation sont techniques et surtout humaines. On peut former un soldat, un ouvrier en quelques jours, un ingénieur en quelques années. Pour obtenir les résultats d'expériences dans le domaine industriel, il faut quelques heures ou quelques jours. Dans le domaine agronomique il faut souvent attendre un cycle biologique de quelques mois à plusieurs années, et la formation des hommes est extrêmement longue.

L'humanité est donc engagée dans une immense bataille : sur une partie du globe elle continue à

pratiquer des modes primitifs d'exploitation des sols. Mais le nombre des exploitants augmente : ils demandent de plus en plus de récoltes à des terres auxquelles ils ne fournissent ou ne restituent presque aucun des éléments nécessaires à un équilibre. Les conséquences de ces méthodes sur l'existence et la fertilité des sols sont catastrophiques.

Dans d'autres régions elle essaie de mettre en place des agronomies modernes qui pourraient résoudre les problèmes de production, mais les progrès sont lents et risquent de le rester. Enfin dans certaines régions favorisées les hommes pratiquent une agriculture en expansion dont les produits permettent de combler partiellement et momentanément le déficit global de produits alimentaires.

Les besoins des hommes, les progrès de la production et la dégradation des sols s'équilibreront-ils un jour ? Sur le front de la faim, la civilisation moderne marquera-t-elle enfin des points ? Il faut, dans l'état actuel des choses, un solide optimisme pour répondre affirmativement.

CONCLUSION

La pédologie, étude de la formation, de l'évolution et de la répartition des sols à la surface du globe, est une science jeune. Née d'observations sur le terrain elle est restée pendant des décades une science descriptive utilisant analyses et mesures pour fonder les comparaisons entre sols différents et pour comprendre leur répartition. Depuis vingt ou vingt-cinq ans elle évolue rapidement. Des méthodes nouvelles sont utilisées pour mieux connaître les éléments constitutifs des sols, en particulier l'argile et la matière organique. Des études expérimentales de plus en plus nombreuses permettent de reproduire artificiellement les phénomènes pédologiques observés sur le terrain, et les caractères morphologiques des sols sont de plus en plus l'objet de mesures précises qui en facilitent une connaissance plus objective et une comparaison plus exacte. En même temps elle devient plus complexe, mais, profitant des progrès des sciences sur lesquelles elle s'appuie, elle amène à comprendre plus profondément la structure intime des sols et les processus qui s'y développent. Science carrefour et science de synthèse elle doit peu à peu s'intégrer dans les cadres des enseignements tant secondaire que supérieur. Science physicochimique en même temps que science naturelle, elle peut aider à l'avancement des sciences sur lesquelles elle s'appuie, en permettant facilement de comparer

les résultats des études, analyses et déductions aux faits observés dans la nature.

C'est aussi une science d'avenir grâce à l'appui qu'elle apporte à d'autres sciences et grâce à ses applications si nombreuses et si diversifiées sur le plan de la mise en valeur régionale, de l'amélioration des techniques agricoles aussi bien que sur celui de la construction des routes, des aérodromes, des bâtiments et sur celui des travaux publics en général.

Cet essor de l'utilisation des études pédologiques présente cependant deux dangers : d'abord celui de leur attribuer une valeur explicative ou trop universelle ou trop exclusive ; ensuite, devant l'urgence des problèmes à résoudre, le danger d'abandonner les études de laboratoire lentes et précises, indispensables pour affermir les assises d'une science aussi jeune, pour ne développer que les observations de terrain ou des méthodes d'étude nouvelles très rapides mais dont les résultats sont parfois illusoire.

Pour permettre ce développement indispensable et éviter ces écueils, il faut des pédologues toujours plus nombreux mais possédant une formation scientifique très poussée, faite de méthode et de connaissances. Les études pédologiques méritent un tel effort car elles procurent à ceux qui s'y adonnent à la fois la joie de connaître et la joie de servir.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- BACHELIER (G.), 1963. — *La vie animale dans les sols*, Paris, O.R.S.T.O.M.
- BOULAIN (J.), 1957. — *Les sols des plaines du Chélib*, Alger, Gouvernement général de l'Algérie.
- CAILLÈRES (S.) et HENIN (S.), 1963. — *Minéralogie des argiles*, Paris, Masson.
- CAMEZ (Th.), 1962. — *Etudes sur l'évolution des minéraux argileux*, Université de Strasbourg.
- DEMOLON (A.), 1960. — *Dynamique du sol*, Paris, Dunod.
- DUCHAUFOUR (P.), 1965. — *Précis de pédologie*, Paris, Masson.
- DUPUIS (J.), 1952. — *Contribution à l'étude des sols du Gâtinais*, Alençon.
- DURAND (J.-H.), 1958. — *Les sols irrigables*, Alger. Gouvernement général de l'Algérie.
- ERHART (E.), 1956. — *La genèse des sols en tant que phénomène géologique*, Paris, Masson.
- FOURNIER (F.), 1960. — *Climat et érosion*, Paris, Presses Universitaires de France.
- KELLOG (Ch. E.) et al., 1938. — *Formation of soils, soil classification, soils and men, U.S.D.A. year book of agriculture*, U. S. Gov. P. O.
- KONONOVA (M. M.), 1961. — *Soil organic matter*, Oxford, Pergamon Press.
- KUBIENA (W. L.), 1952. — *Claves sistematicas de suelos*, Madrid, C.S.I.C.
- LENEUF (N.), 1959. — *L'altération des granites calco-alcalins et des granodiorites en Côte d'Ivoire forestière et les sols qui en sont dérivés*, Paris, Lang Grandemange.
- MAIGNIEN (R.), 1958. — *Le cuirassement des sols en Guinée*, Mém. Srv., Carte géol. Alsace-Lorraine, Strasbourg.
- MANCINI (F.), 1955. — *Delle terre brune d'Italia*, Florence.
- MARGULIS (H.), 1963. — *Pédologie générale*, Paris, Gauthier-Villars.
- MILLOT (G.), 1964. — *La géologie des argiles*, Paris, Masson.
- MOHR (E. C. J.) et VAN BAREN (F. A.), 1954. — *Tropical soils*, N. V. Uitgeverij w, Van Hoeve, the Hague.
- MUCKENHAUSEN (E.), 1962. — *Entstehung, Eigenschaften und systematik der boden der Bundesrepublik Deutschland*, Francfort-Main, D.L.G. Verlag.
- PEDRO (G.), 1964. — *Contribution à l'étude expérimentale de l'altération géochimique des roches cristallines*, *Ann. Agronomiques*, v. 15, n° 2-3-4.
- PLAISANCE (G.) et CAILLEUX (A.), 1958. — *Dictionnaire des sols*, Paris, La maison rustique.
- POCHON (J.) et de BARJAC (H.), 1958. — *Microbiologie des sols*, Paris, Dunod.
- ROBINSON (G. W.), 1949. — *Soils*, London, Th. Murby.
- RUSSEL (W.), 1961. — *Soils condition and plant Growth-Longmans*, 8^e éd., London.
- SEGALEN (P.), 1957. — *Etude des sols dérivés des roches volcaniques basiques à Madagascar*, Mém. Inst. Scient. Madagascar, D. VIII.
- SEGALEN (P.), 1964. — *Le fer dans les sols*, Paris, O.R.S.T.O.M.
- STEPHENS (C. C.), 1953. — *A manual of australian soils*, Melbourne, C.S.I.R.O.
- VINK (A. P. A.), 1963. — *Aspects de pédologie appliquée*, Neuchâtel, La Baconnière.
-

TABLE DES MATIÈRES

	PAGES
INTRODUCTION	5

PREMIÈRE PARTIE

GÉNÉRALITÉS

CHAPITRE PREMIER. — La notion de sol	7
— II. — Les facteurs de différenciation des sols	22
— III. — La classification des sols	38

DEUXIÈME PARTIE

LES DIFFÉRENTS TYPES DE SOLS

I. Classe des sols minéraux bruts, 41. — II. Classe des sols peu évolués, 45. — III. Classe des sols calcomagnésimorphes, 48. — IV. Classe des vertisols, 51. — V. Classe des sols isohumiques, 55. — VI. Classe des sols podzolisés, 60. — VII. Classe des sols brunifiés, 65. — VIII. Classe des sols riches en sesquioxydes, 72. — IX. Classe des sols halomorphes, 82. — X. Classe des sols hydromorphes, 88.

TROISIÈME PARTIE

APPLICATIONS DE LA PÉDOLOGIE

CHAPITRE PREMIER. — La cartographie des sols	95
— II. — Pédologie et technique agricole.....	104
— III. — Les sols et l'histoire de la biosphère..	112
— IV. — Les sols, l'érosion et les civilisations.	117
CONCLUSION	125
BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE	127

Que sais-je?

Collection dirigée par Paul Angoulvent

Derniers titres parus

- | | |
|---|---|
| 1208. Les écrivains anglais d'aujourd'hui (A. FARMER). | 1233. Le Soleil et la Terre (A. BOISCHROT). |
| 1209. Le Front populaire (G. LEFRANC). | 1234. Grammaire du latin (J. COLLART). |
| 1210. La croissance économique (P. MAILLET). | 1235. La navigation par inertie (J.-Cl. RADIX). |
| 1211. La géométrie élémentaire (A. DELACHET). | 1236. Les comètes (J. DUFAY). |
| 1212. La musique de danse (A. MACHABEY). | 1237. L'Inquisition (G. et J. TESTAS). |
| 1213. Kant et le kantisme (J. LACROIX). | 1238. Les Mérovingiens (G. FOURNIER). |
| 1214. La Restauration (1814-1830) (J. VIDALENC). | 1239. Géographie de la France (R. CLOZIER). |
| 1215. Géographie de l'Océanie (A. HUETZ DE LEMPS). | 1240. Le travail en Grèce et à Rome (Cl. MOSSÉ). |
| 1216. La psychopharmacologie (P. DENIKER). | 1241. Le plancton (P. BOUGIS). |
| 1217. La monnaie et ses mécanismes (P. BERGER). | 1242. Géographie de l'Asie du Sud-Est (J. DELVERT). |
| 1218. La promotion sociale (G. THÜLLIER). | 1243. La radioécristallographie (Ch. LEGRAND). |
| 1219. Les études de marchés (F. BOUQUEREL). | 1244. La Chine impériale (D. LOMBARD). |
| 1220. La maladie infectieuse (V. VICDUPONT). | 1245. Le Coran (R. BLACHÈRE). |
| 1221. Le microfilm (Y.-M. RELIER). | 1246. L'algèbre de Boole (G. CASANOVA). |
| 1222. La politique des revenus (J.-P. COURTHÉOUX). | 1247. Le latin vulgaire (J. HERMAN). |
| 1223. La santé mentale (Fr. CLOUTIER). | 1248. Le pH et sa mesure (Cl. ROCCHICCIOLI). |
| 1224. Géographie de l'Amérique du Sud (M. ROCHEFORT). | 1249. L'Antarctique (A. CAILLEUX). |
| 1225. Mussolini et le fascisme (P. GUICHONNET). | 1250. Les noms des animaux terrestres (L. GUYOT et P. GIBASSIER). |
| 1226. Histoire des doctrines politiques en Grande-Bretagne (P. NORDON). | 1251. L'algèbre linéaire (J. BOUTELOUP). |
| 1227. L'aide aux pays sous-développés (Fr. LUCMAIRE). | 1252. Le droit maritime (A. BOYER). |
| 1228. L'histologie (J. VERNE). | 1253. Grammaire du grec (Ch. GUIRAUD). |
| 1229. Le siècle de Louis XV (H. MÉTHIVIER). | 1254. Le soufre (Cl. DUVAL). |
| 1230. La théologie protestante (R. MEHL). | 1255. L'alpinisme (P. BESSIÈRE). |
| 1231. Le Nouveau Testament (O. CULLMANN). | 1256. L'investissement international (G.-Y. BERTIN). |
| 1232. Le ski (J. FRANCO). | 1257. Cybernétique et biologie (A. GOUDOT). |
| | 1258. La chirurgie du cœur (Cl. d'ALLAINES). |
| | 1259. Le royalisme (Ph. du PUY DE CLINGCHAMPS). |
| | 1260. Le foie et ses maladies (J. CAROLI et Y. HECHT). |