HAL
open science

Sols. 3. Proprietes physiques et mecaniques

Gwendal Monnier

To cite this version:

Gwendal Monnier. Sols. 3. Proprietes physiques et mecaniques. Encyclopedia universalis, Encyclopedia Universalis France, 1973. hal-02859146

HAL Id: hal-02859146

https://hal.inrae.fr/hal-02859146

Submitted on 8 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ANC 19 – ANC 20

pathogènes qui sont, pour la plupart, détruits par la chaleur à 75 °C. Il peut s'agir aussi de micro-organismes non pathogènes, tels que les nitrificateurs, dont l'activité excessive entraîne l'eutrophisation des sols ou des eaux, ou des pertes d'azote par lessivage ou dénitrification; les inhibiteurs de nitrification applicables dans ce cas sont très efficaces, mais malheureusement d'un prix de revient trop élevé. A côté de son effet principal (élimination de micro-organismes nuisibles), la stérilisation partielle exerce un effet secondaire, qui consiste en des modifications de l'équilibre biologique du sol, favorisant la prolifération et l'activité de certains groupes ou espèces microbiennes. Dans certains cas, les conséquences sont bénéfiques, dans d'autres, elles ne le sont pas : c'est ainsi que la stérilisation partielle, par la chaleur, de sols de serre peut amener des accidents secondaires dus à une ammonification trop intense.

4 *Autres applications*

En dehors de l'intérêt évident qu'elle présente en agronomie, la microbiologie du sol peut contribuer efficacement à résoudre divers problèmes intéressant la pédologie et la géologie, le génie civil (corrosion) et la pollution de l'environnement.

Les micro-organismes telluriques interviennent dans deux processus pédogénétiques essentiels (cf. PÉDOLOGIE, SOLS) : altération des minéraux, formation d'horizons d'accumulation. La solubilisation des minéraux résulte essentiellement de l'action agressive de composés complexants d'origine végétale (provenant notamment des litières) ou microbienne. Les complexes organo-minéraux ainsi formés peuvent, à leur tour, être biodégradés par certains secteurs de la microflore tellurique. Si cette biodégradation est discrète, les complexes peuvent circuler facilement dans les profils : la chéluviation est active; si, au contraire, certains horizons des profils sont favorables à l'activité microbienne (pH assez élevé, absence de composés toxiques, aération suffisante, etc.), les complexes organo-métalliques sont biodégradés; les ions complexés (Fe et Al notamment) sont libérés et précipitent. C'est parce qu'ils ne sont pas biodégradés dans les horizons supérieurs des podzols que les complexes organo-minéraux peuvent, dans ce type pédologique, migrer en profondeur. La formation de certains gisements d'uranium, d'or, de fer, de nickel résulterait de la succession de phases d'intervention microbienne (solubilisation par production de composés complexants), de non-intervention microbienne (permettant la chéluviation) et, à nouveau, d'intervention microbienne (précipitation par biodégradation des complexes et concentration dans le gîte).

Des matériaux divers en contact direct ou indirect avec le sol (ciments, pierres, métaux) peuvent subir une corrosion aérobie où sont impliqués des micro-organismes (*Thiobacillus*); les métaux placés dans des sols mal aérés, en contact avec des eaux polluées, sont fréquemment le siège de corrosions graves dues aux *Desulfovibrio*.

Les dangers de pollution des sols et des eaux par les agents microbiens ou les agents chimiques s'accroissent chaque jour (cf. PESTICIDES ET LUTTE BIOLOGIQUE). Si les processus de décontamination par voie microbienne ou par voie chimique ou physique commencent à être relativement bien connus, on ne sait encore à peu près rien des facteurs complexes qui interviennent *in situ* pour ralentir ou bloquer le déroulement des réactions biologiques : il appartient au microbiologiste écologiste d'élucider le rôle de ces facteurs, en faisant éventuellement appel à des modèles mathématiques dans la phase exploratoire de ses recherches.

Y. D.

Bibliographie et corrélats

Voir la bibliographie générale et les corrélats généraux, pages 138 et 139.

SOLS

3. Propriétés physiques et mécaniques

1 *Principales propriétés physiques*
Caractéristiques hydriques
Caractéristiques thermiques
L'aération du sol
Propriétés du sol et enracinement
2 *Evolution de la structure*
3 *Propriétés mécaniques*

Du point de vue de ses propriétés physiques et mécaniques, le sol peut être considéré comme un système poreux à trois phases : solide, liquide, gazeuse.

Certaines des caractéristiques de ce système sont permanentes; c'est le cas de la constitution physique du matériau : granulométrie, morphologie et espèce minéralogique des particules élémentaires. De façon très globale, un matériau déterminé peut être caractérisé une fois pour toutes par sa *texture*, qui traduit l'influence sur son comportement des différents constituants et des interactions qui se manifestent entre eux.

D'autres éléments de description sont plus contingents : la géométrie du système, couramment appelée *structure* par les agronomes et les pédologues, bien qu'elle dépende au premier chef de la texture, varie en fonction de l'intervention de facteurs climatiques (pluie, gel, sécheresse), biologiques (racines des végétaux, micro-organismes et macro-organismes du sol) et mécaniques, ces derniers mis en œuvre par l'homme pour l'utilisation du sol (agriculture, génie civil, etc.).

Enfin, l'équilibre des phases solides et liquides se déplace incessamment, et parfois de façon très rapide, en fonction du régime hydrique du sol.

Il résulte de ces considérations que les notions instantanées d'état physique et de comportement mécanique doivent être complétées par celles de leur évolution dans le temps, principalement en fonction de l'humidité.

1 *Principales propriétés physiques*

En interaction étroite avec les facteurs du climat, les propriétés physiques commandent les conditions de température, d'aération, de circulation et de stockage de l'eau, d'implantation et de fonctionnement du système racinaire des végétaux.

Plus ou moins directement, toutes les propriétés physiques se rattachent à une caractéristique fondamentale qui est la *porosité*.

La porosité d'une couche de sol en place est la partie d'un volume apparent unitaire qui n'est pas occupée par la phase solide. On la détermine à partir de mesures de densité apparente d_a (poids de terre sèche par unité de volume apparent) et de densité ou poids spécifique réel d_r de la phase solide. La porosité totale P s'exprime en pour cent, à partir de ces données, par la relation :

$$P = \left(1 - \frac{d_a}{d_r}\right) \times 100.$$

Cette porosité est susceptible de varier de valeurs inférieures à 25 p. 100, pour des sols sablo-limoneux compacts, à des valeurs supérieures à 60 p. 100, pour des matériaux à structure fragmentaire fine, ou bien à la surface de sols argileux humides et fortement gonflés.

A la connaissance du volume total de l'espace poreux doit s'ajouter une évaluation de sa configuration : la taille des pores principalement, mais aussi leur forme, leur orientation, leur degré de connexion, leur tortuosité, etc. On doit pour cela faire appel à toute une série de techniques : porosimétrie au mercure, perméamétrie, morphométrie sur plaque mince, établissement de courbes de pF (teneur en eau en fonction de la succion), etc.

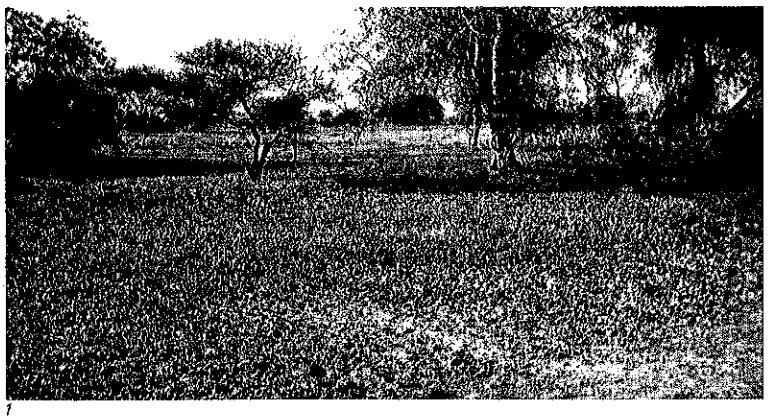
D'un autre point de vue, la porosité totale du sol résulte le plus souvent de la superposition de différents niveaux d'arrangement des constituants du sol :

— A l'échelle de l'assemblage élémentaire, la disposition relative des particules individualisées au cours de l'analyse granulométrique ménage un premier système de porosité dite, du fait de son origine, texturale;

— Dans le cas des structures fragmentaires, les éléments structuraux sont délimités par un réseau plus ou moins complexe de fissures qui constitue, avec les canalicules et alvéoles d'origine biologique ou pédologique, un deuxième système de porosité dite structurale.

Sous l'effet de divers facteurs biologiques et physico-chimiques, les sols s'organisent en horizons dont l'ensemble forme des profils. La planche ci-contre montre quelques-uns des types pédologiques le plus souvent observés dans les différentes régions du monde.

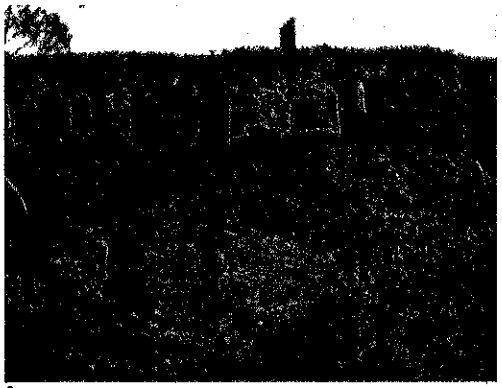
1. A la surface du sol d'un bras comblé du lac Tchad se sont déposés des cristaux salins, principalement de carbonate de soude (salant blanc), mêlés d'éléments humiques dissous dans le sol (salant noir). Ces efflorescences se sont formées par évaporation après remontée capillaire à partir d'une nappe très minéralisée riche en carbonate de soude. — 2. Dans ce sol sodique (solonetz), l'argile enrichie en sodium a migré et s'est accumulée, donnant naissance aux grosses « colonnettes » à sommets arrondis. Le sel provient des embruns marins apportés par le vent. — 3. La rendzine, ici sur roche calcaire dure, est caractérisée par sa faible épaisseur, sa richesse en cailloux calcaires et en humus et sa structure grenue affirmée. — 4. Ce sol rouge fersiallitique, formé sur calcaire dur, est remarquable par sa couleur et par sa structure. Le passage entre le sol décarbonaté et la roche calcaire est brutal. — 5. Dans ce sol châtain, à profil calcaire différencié, la teneur en matière organique est élevée et elle ne décroît que progressivement en profondeur. La structure, assez arrondie en surface, devient un peu plus large et plus prismatique en profondeur, où s'accumule le calcaire. — 6. Dans ce sol à structure très massive, l'accumulation de l'argile et des sesquioxydes de fer a donné naissance à de nombreuses concrétions et à un début d'induration. Dans un stade ultérieur d'évolution pourrait apparaître une véritable cuirasse ferrugineuse. — 7. L'un des caractères remarquables de cet horizon supérieur de sol rouge ferrallitique (dont la profondeur totale doit atteindre au moins 6 à 8 mètres) est sa grande friabilité liée à une structure assez fine. On peut noter aussi la présence d'une matière organique très évoluée, très bien liée à la matière minérale. — 8. Le profil de ce sol brun acide est relativement simple. Deux horizons s'y distinguent : le supérieur plus humifère, à matière organique bien liée à la matière minérale, l'inférieur un peu plus coloré et plus structuré sans qu'il s'y produise une accumulation d'argile. — 9. Contrairement au profil précédent, celui du sol brun lessivé présente une différenciation structurale très marquée, encore accentuée par la structure prismatique accusée de l'horizon inférieur d'accumulation. Les horizons A et B de ce sol sont dépourvus de calcaire, élément qui s'est accumulé, sous diverses formes, en profondeur. — 10. Les caractères essentiels du podzol s'observent bien sur ce profil de sol sous lande à bruyères. L'humus, brut en surface, est encore grossier dans l'horizon sous-jacent. L'horizon A_2 est parfaitement cendreux, et les horizons d'accumulation, dans les cailloux et blocs de quartzites et débris de schistes, sont remarquablement enrichis en humus et, plus en profondeur, en sesquioxydes de fer. La pauvreté en base de la roche mère (schistes et quartzites) est, avec la forte pluviométrie du lieu et la végétation à débris résistant à la décomposition par les micro-organismes, la cause de la formation d'un podzol aussi typique.



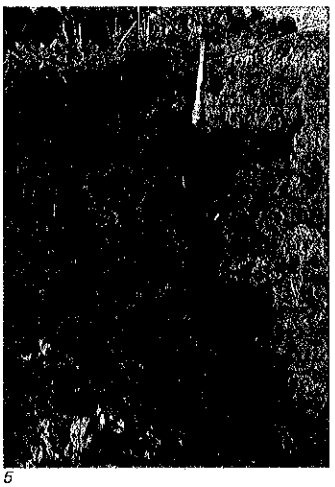
1

5. Sol châtain sur limon calcaire, près de Mazagan (Maroc). — 6. Sol ferrugineux tropical lessivé à concrétions, à Garango (Haute-Volta). — 7. Sol rouge ferralitique sur dolérite, entre Mali et Labbé (Guinée). — 8. Sol brun acide, sur schistes argileux, à Saint-Cyr-en-Pail (Mayenne). — 9. Sol brun lessivé sur limon, près de Grignon (Yvelines). — 10. Podzol, à Saint-Michel de Brasparts (Finistère).

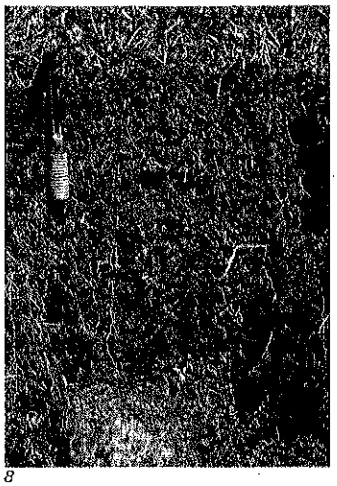
(1 à 10 : G. Aubert.)



2

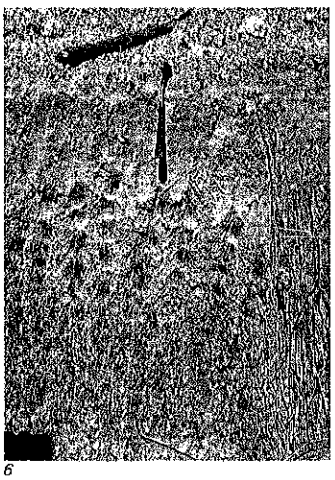


5



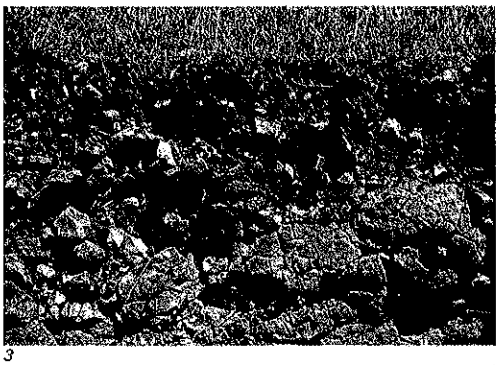
8

1. Sol sodique à salant noir et salant blanc, dans un «ouadi» du lac Tchad, près de Bol (Tchad). — 2. Solonetz de la région de Brisbane (Australie). — 3. Rendzine située dans la côte de Bourgogne, près de Beaune (Côte-d'Or). — 4. Sol rouge sur calcaire dur, au Portugal.



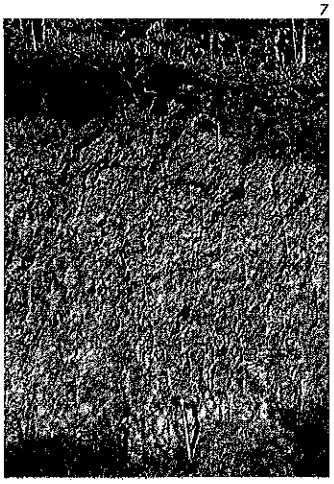
6

9



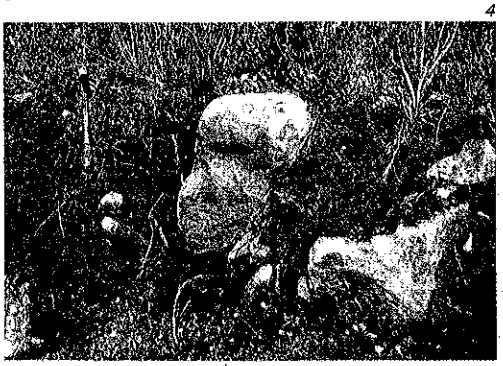
3

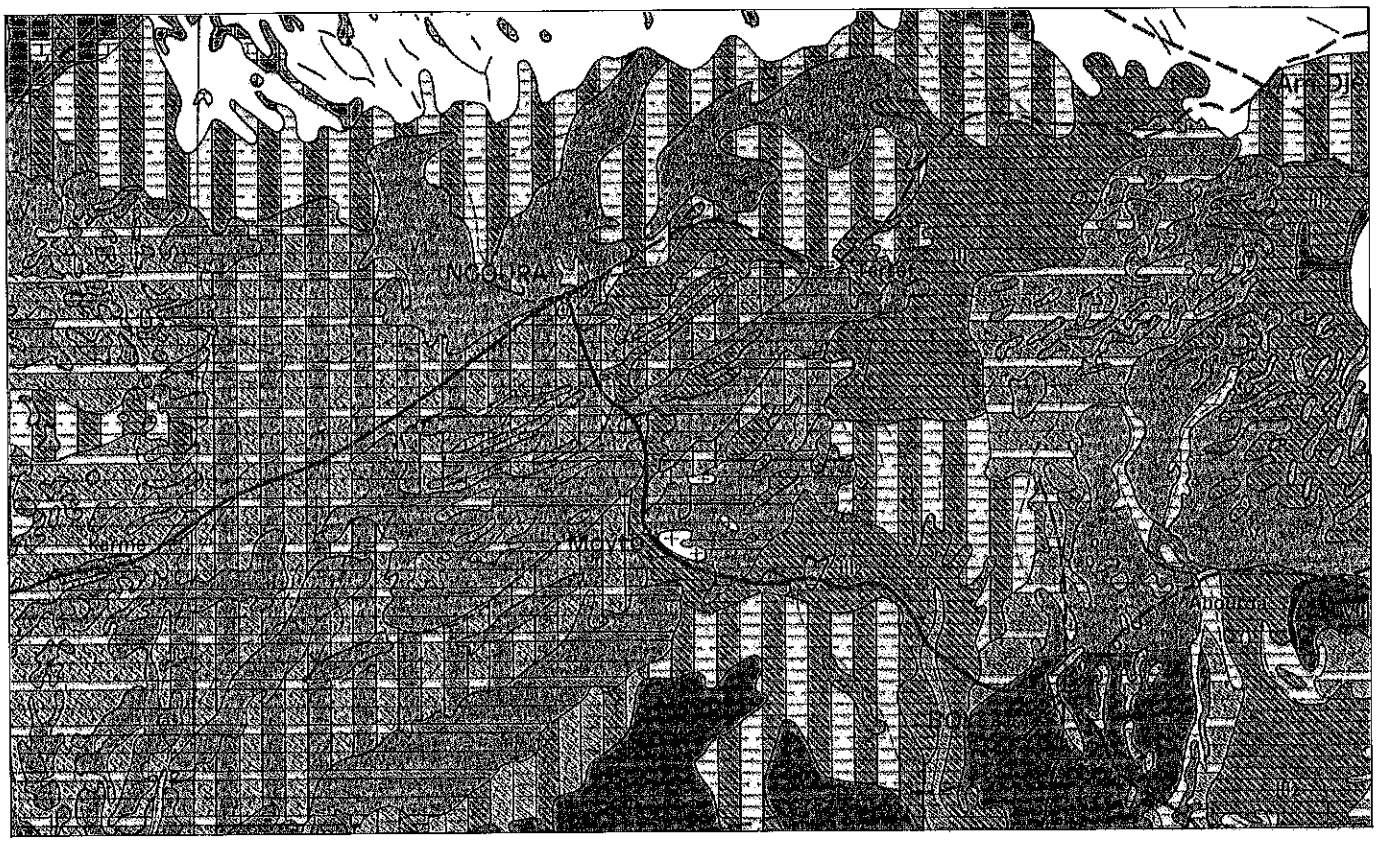
7

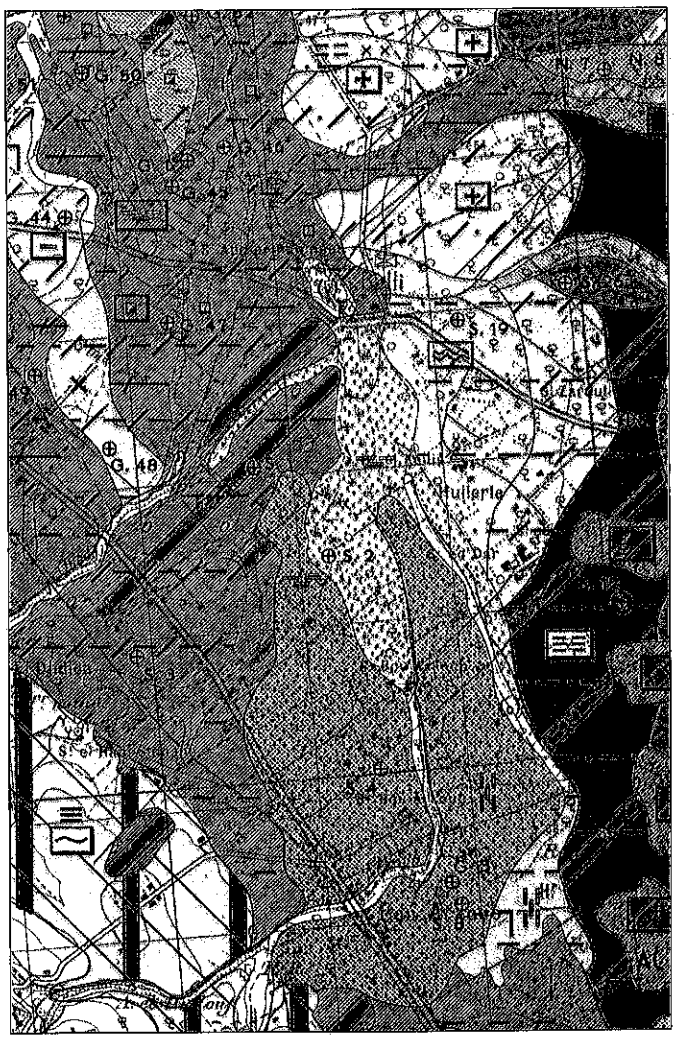


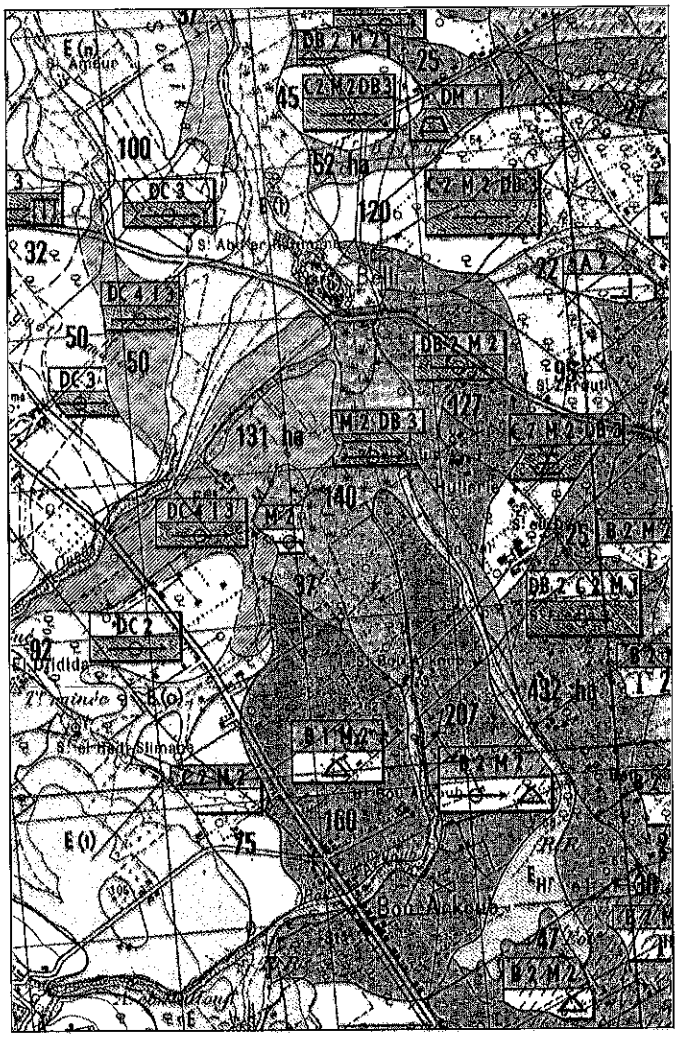
10

4




NGOURA
Karma
Moyto
Anoussa

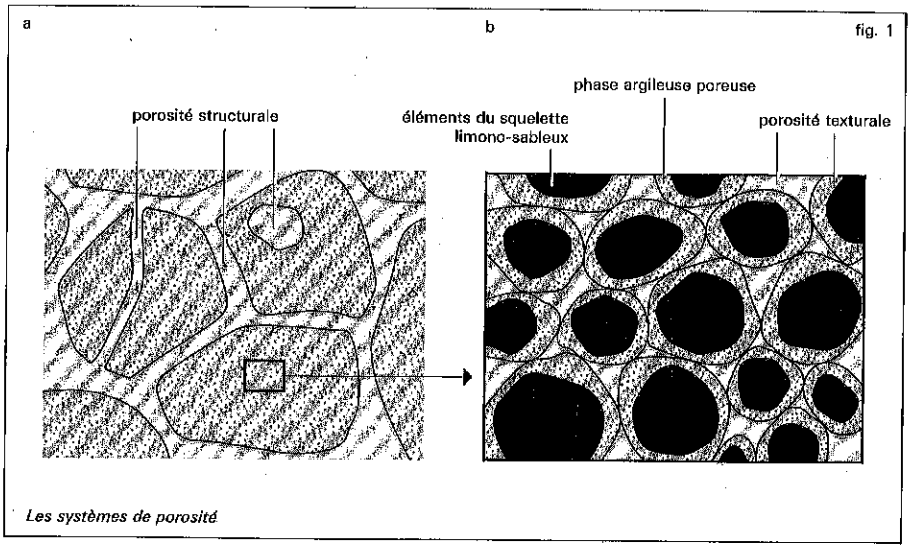

Zarqui
Huilerie


E (n)
St. Amour
DB 2 M 2
CZ M 2 DB 3
DM 1
45
100
52 ha
DC 3
120
CZ M 2 DB 3
32
DC 4 1 3
50
DC 3
DB 2 M 2
95
127
131 ha
M 2 DB 3
CZ M 2 DB 3
140
DC 4 1 3
M 2
25
B 2 M 2
37
DB 2 G 2 M 1
DC 2
92
El Djidida
432 ha
207
B 1 M 2
CZ M 2
160
E (i)
75
Bou Arkoub
47
M 2 M 2

PL. II

La *porosité texturale* (fig. 1 b) représente la fraction la plus importante et la plus fine de la porosité totale. Son rôle est essentiel dans le domaine de la réserve en eau des sols, de la circulation de l'eau par des mécanismes de succion, de la température et de l'aération du sol; on la mesure sur des agglomérats terreux d'une taille suffisamment petite pour ne pas comporter de porosité structurale ou sur un échantillon auquel on a conféré artificiellement une structure continue et homogène. On peut considérer que c'est une caractéristique intrinsèque du matériau à une humidité donnée.

La *porosité structurale* (fig. 1 a) a fréquemment une taille suffisante pour être observable à l'œil nu ou à un faible grossissement. Elle ne constitue, si l'on excepte les couches du sol qui viennent d'être ameublies, que quelques pour cent du volume apparent unitaire. Bien que chaque système de porosité n'ait pas l'exclusivité de régir tel ou tel phénomène, son influence est prépondérante sur les possibilités d'enracinement, l'indice d'ameublissement global d'un horizon, la perméabilité à l'eau circulant par gravité. Elle est obtenue par différence entre la porosité totale et la porosité texturale, et elle est susceptible de variations aussi rapides que celles de l'état structural du sol dont elle est la conséquence.



Les systèmes de porosité

Caractéristiques hydriques

Stockage de l'eau

Lorsqu'on apporte à un sol une quantité suffisante d'eau, il peut être saturé, c'est-à-dire que la totalité de sa porosité est remplie d'eau (fig. 2). Même en l'absence de toute évaporation, la teneur en eau correspondant à la saturation n'est, très généralement, pas stable; l'eau contenue dans la fraction la plus grossière de la porosité (macroporosité) circule par gravité ou par succion des couches inférieures plus sèches : le sol se « ressuie » et tend vers un palier d'humidité correspondant à la *capacité au champ* (l'eau occupe alors ce qu'on appelle la microporosité).

A cette humidité caractéristique, l'eau ne circule plus que très lentement et le sol ne se dessèche que par évaporation directe pour les couches les plus superficielles ou par absorption d'eau par le système racinaire des végétaux. Ce dernier ne peut extraire de l'eau du sol que jusqu'à une humidité limite qui est caractéristique du matériau et qui correspond au *point de flétrissement permanent*.

L'évaluation directe de la capacité au champ et du point de flétrissement permanent est délicate et se prête mal à des déterminations en grande série. Aussi a-t-on recours à des évaluations en laboratoire. Le sol, qui a été préalablement saturé, est ressuyé sous une pression pneumatique convenablement choisie et qui varie suivant la texture de ce sol et, bien entendu, la caractéristique hydrique à laquelle on s'intéresse.

En définitive, l'eau utile pour les végétaux correspond à l'intervalle entre la capacité au champ c et le point de flétrissement permanent f (fig. 2). Exprimée en millimètres, la réserve en eau utile R d'une couche de sol d'épaisseur p (en dm) peut être calculée par la relation :

$$R = (c - f)d_a \times p,$$

dans laquelle c et f sont exprimés en grammes d'eau pour 100 grammes de terre sèche et où d_a représente la densité apparente (tabl. 1).

◀ *Les extraits de cartes de sols ci-contre sont des exemples de trois types fréquemment réalisés par les pédologues de l'école française.*

La base de la légende de la carte 1 (« Carte pédologique du Tchad » à l'échelle de 1/1 000 000 par J. Pias et le service cartographique de l'O.R.S.T.O.M.), de type synthétique, est la classification pédologique française, de conception morphogénétique, au niveau des sous-groupes et familles de sols (cf. PÉDOLOGIE). Les unités correspondent donc à des modes et intensités d'évolution des sols sur des matériaux originels définis par leurs éléments pétrographiques, le tout étant exprimé par les caractères morphologiques des profils de sols dans leurs paysages. La classification pédologique utilisée, par suite même de sa conception, ne peut comprendre comme unités définies tous les cas observables, sous peine de perdre ses qualités de simplicité. Aussi la carte comporte-t-elle des « unités intergrades », rapprochées d'unités typiques, sans y correspondre parfaitement. L'échelle ne permet pas d'exprimer toute la complexité de la répartition des sols en certaines régions. L'unité cartographique est alors la « juxtaposition de sols », qui correspond à la présence, en une zone déterminée, de deux ou trois principaux types de sols, sans qu'il soit possible de représenter leurs relations géographiques. A chaque classe de sols est attribuée une couleur qui reste la même, au moins pour des types de cartes déterminés, dans toutes les cartes réalisées par les pédologues de l'O.R.S.T.O.M. ou des instituts et compagnies qui collaborent avec cet organisme. Seuls les sols minéraux bruts sont laissés en blanc; les sols peu évolués sont en gris, les vertisols en violet, les sols isohumiques en brun et en jaune, les sols ferrugineux tropicaux en brun rouge, les sols halomorphes en vert, les sols hydromorphes en bleu. Aux sous-classes correspondent des variations dans la couleur fondamentale; et aux groupes et sous-groupes, des intensités différentes. Les unités intergrades comportent de fines barres horizontales dans la couleur de fonds de l'unité de base apparentée. Des baguettes de couleurs différentes, sur une zone déterminée, représentent les juxtapositions de sols, les principaux d'entre eux étant exprimés par les couleurs des baguettes. Les familles de sols dans chaque sous-groupe sont indiquées par des grisés tels que les petits points pour les sables, les lignes horizontales pour les alluvions plus ou moins limoneuses ou argileuses, les petites croix pour les roches cristallines.

Les cartons 2 et 3 (échelle 1/50 000) sont extraits de « L'Étude pédologique de la plaine de Grombalia » par A. Chauvel (Sogetha) et le service cartographique de l'O.R.S.T.O.M., dans le cadre des travaux réalisés par la section de pédologie du service de l'hydraulique et de l'équipement rural du secrétariat à l'Agriculture de la République tunisienne (publiée avec l'aimable autorisation du Service pédologique de Tunisie).

La carte 2 est une carte pédologique de détail, régulière. Les unités de la légende correspondent aux sous-groupes et à certains faciès principaux ainsi qu'aux familles de sols, comme indiqué ci-dessus. Certaines séries importantes sont individualisées, le plus souvent caractérisées par la présence d'un sol enterré. Par suite de l'échelle assez grande, les juxtapositions de sols y sont rares (baguettes verticales). Comme précédemment, les couleurs correspondent aux sous-groupes et faciès de sols, et chaque couleur de base à une classe de sols : le gris pour les sols peu évolués, le jaune pour les sols calcomagnésimorphes, le brun rose clair pour les sols à humus doux, le rouge pour les sols à hydroxydes, le vert pour les sols halomorphes, le bleu pour les sols hydromorphes. Les sous-groupes hydromorphes apparaissent grâce à la présence de barres bleues en oblique. Les caractères pétrographiques correspondant à la définition des familles de sols sont indiqués par des grisés. Par ailleurs, un certain nombre de signes complémentaires sont portés sur la carte, exprimant la présence de caractères particuliers des sols sans qu'il ait été possible de délimiter les zones où ils sont observés. Dans de nombreux cas, il s'agit d'éléments indiquant, de façon plus ou moins nette, une certaine hydromorphie : présence de nappes phréatiques temporaires (cartouches avec petits traits droits), croûte de nappe (cartouche à traits ondulés), mauvais drainage (flèches horizontales), marmorisation, gley ou pseudogley peu étendus (figures diverses en traits noirs et rouges ou bruns), etc.; ou encore d'éléments présentant une certaine importance pratique sur le plan agricole, comme la présence de sols enterrés (cartouches avec des signes divers), de lits de galets (petits polygones à côtés plus ou moins courbes), etc. Enfin les emplacements des profils étudiés sont indiqués par une croix dans un cercle.

Parmi les utilisations possibles des « terres » ou des « terrains » (plutôt que des « sols »), se trouve leur mise en culture ou, complémentairement, leur aménagement comme zone de « récréation ». Certains « aménagistes » estiment qu'une simple étude rapide du « paysage » suffit pour fonder le choix à faire. D'autres, comme ceux de l'U.S. Bureau of Reclamation, demandent en plus quelques analyses de sols pour compléter une cartographie rapide en classes de potentialités. Pour d'autres encore, une interprétation précise de la carte des sols est la meilleure préparation au plan d'aménagement (U.S. Soil Survey). Pour un grand nombre de pédologues, agronomes, écologistes et aménagistes, en particulier pour ceux de l'école française, un stade intermédiaire est nécessaire : celui de la carte d'aptitudes ou de limitations culturales, en fonction des conditions écologiques du lieu, des pratiques culturales envisagées et des principales productions possibles. La carte 3 en est un exemple. De telles cartes ne sont envisageables qu'à une échelle suffisamment détaillée et ne sont que l'expression, en fonction des éléments supplémentaires sus-indiqués, de la carte des sols. De nombreuses limites sont les mêmes; certaines sont supprimées, les différences entre les catégories de sols envisagées n'ayant qu'une importance limitée quant à leur utilisation; d'autres apparaissent indiquant l'extension de certains facteurs, souvent de pente, d'état de dégradation (érosion), etc., dont l'influence est grande sur le plan de leurs aptitudes culturales. En zone aride, au moins deux cartes sont dressées, celle des aptitudes aux cultures pluviales et, comme le carton ci-contre, celle des aptitudes aux cultures irriguées. Parfois il en est dressé un plus grand nombre, en fonction des principaux types de cultures possibles (carte des sols de Belgique). Ici, cinq grandes catégories sont envisagées, mais les aptitudes sont reportées sur la même carte; à chacune correspond une couleur. Trois indiquent les zones où un type particulier de culture irriguée est nettement préférable aux autres : brun ocre, cultures arbustives à enracinement profond (B); jaune, cultures annuelles à enracinement assez superficiel (C); violet, cultures maraichères (M). Les zones aptes aux pâturages ou à la forêt n'ont pas été délimitées ici pour des raisons écologiques et économiques; le plus souvent, elles le sont. La couleur rose recouvre les zones les plus fertiles, aptes à tous les types de cultures envisagées (A), et le bleu les zones non irrigables (E). Les chiffres placés à côté de la lettre caractéristique indiquent le degré de qualité des terres par rapport au groupe de cultures envisagées. Les cartouches comportent une couleur dans la moitié supérieure pouvant représenter une seconde possibilité d'utilisation intéressante; leur moitié inférieure est laissée en blanc lorsque aucune grosse amélioration n'est proposée; lorsque, au contraire, des travaux importants paraissent nécessaires, cette moitié inférieure est en vert et la lettre D est rajoutée devant celle qui représente la catégorie de culture qui en profitera le plus. Enfin, certaines lettres minuscules ou signes particuliers expriment soit la raison de certaines inaptitudes (s = salure, cr = croûte calcaire à faible profondeur, etc.), soit la nature des travaux à réaliser (flèche horizontale = assainissement, flèche verticale = dessalage, deux petites raies horizontales et une oblique = enlèvement de croûte, etc.).

Il est à noter que la capacité au champ d'un sol est une caractéristique essentiellement liée à la texture du ou des matériaux qui constituent ses différents horizons (tabl. 2). Comme cela est également vrai pour l'humidité au point de flétrissement permanent, on peut considérer que la réserve en eau d'un sol est une donnée permanente pour une profondeur d'enracinement donnée (tabl. 1).

Circulation de l'eau

Lorsque le sol est saturé, l'eau qui percole à travers une tranche de sol le fait sous l'influence de la gravité. Le débit Q est donné par la loi de Darcy :

$$Q = K\frac{HS}{l},$$

dans laquelle H représente la charge d'eau, S la section de terrain concernée et l l'épaisseur de la tranche de sol. Le coefficient K, qui a les dimensions d'une hauteur d'eau percolant par unité de temps, exprime la perméabilité du terrain. Sa détermination est nécessaire au calcul des réseaux de drainage, mais elle est délicate, quelle que soit la méthode utilisée (blocs de Vergières ou rabattement de nappe de Porchet), car elle ne peut intervenir que sur un matériau non remanié. En effet, c'est principalement l'espace poreux, que nous avons qualifié de structural, qui assure la circulation rapide de l'eau grâce à ses dimensions plus importantes.

Les sols les plus perméables ne sont, de ce fait, pas nécessairement les moins argileux, mais ceux qui ont une porosité structurale suffisante lorsqu'ils sont saturés, c'est-à-dire après gonflement des colloïdes.

Au-dessous de l'humidité correspondant à la capacité au champ, l'eau circule beaucoup plus lentement en obéissant à des lois plus complexes et moins bien établies. Deux facteurs interviennent de façon déterminante : d'une part, le gradient d'humidité et, d'autre part, les dimensions et la configuration de l'espace poreux. C'est ainsi que la « mobilité » de l'eau est plus grande dans les matériaux à texture moyenne (limoneuse ou limono-sableuse) que dans les terres sableuses et argileuses. De même, la distance à laquelle une racine est capable d'extraire l'eau du sol est variable selon la texture, et elle est supérieure dans les sols limoneux dans lesquels un enracinement moins dense peut assurer une exploitation convenable des réserves. Encore faut-il qu'il n'y ait pas déséquilibre entre la succion à laquelle est soumise l'eau (racines, évaporation) et la mobilité de celle-ci ; sinon, il y a rupture du film aqueux et blocage de la circulation de l'eau.

Caractéristiques thermiques

La température du sol influence la vitesse et (ou) l'intensité de nombreux processus biologiques et physiques. En deçà et au-delà de certains seuils, elle peut même les interdire. Parmi les principaux, nous citerons la germination, la croissance racinaire, l'activité de la microflore et, aux basses températures, le gel du sol et les différentes conséquences physiques et mécaniques sur le sol et la plante.

La température en un point donné du sol dépend du bilan de l'énergie calorifique et de la capacité calorifique en ce point.

Si l'on se place dans le cas précis, le plus important en agronomie, du réchauffement du sol au printemps, la première caractéristique qui intervient est l'état de la surface du terrain qui, en sol nu, commande le taux d'absorption de l'énergie solaire incidente. Les terres claires à surface glacée et humide réfléchissent davantage le rayonnement incident que les terres foncées à surface rugueuse. Les agriculteurs disent que les premières sont des terres « froides ».

La transmission de l'énergie absorbée est fonction de la *conductibilité thermique* ; celle-ci est d'autant plus élevée que le sol est plus compact et (ou) qu'il est plus humide (tabl. 3). Un sol peu conducteur, parce que très poreux et peu humide, aura, pour un niveau donné de chaleur absorbée, une élévation plus rapide de la température de sa couche superficielle, et cela d'autant plus que la *capacité calorifique spécifique* d'un tel matériau est généralement assez faible (tabl. 4).

En définitive, ce réchauffement de la partie superficielle du sol dépend en premier lieu de sa teneur en eau, mais aussi de sa structure (macroporosité) et de l'état de sa surface. C'est donc la résultante d'un ensemble de données liées à la nature du terrain et à la manière dont il est cultivé.

L'aération du sol

Le volume et la composition de l'atmosphère du sol ont d'importantes conséquences sur la plupart des phénomènes biologiques du sol, qu'il s'agisse de l'implantation et du fonctionnement du système racinaire ou de l'activité des micro-organismes.

Le volume de gaz contenu dans l'unité de volume d'un sol en place correspond, à chaque instant, à la part de la porosité qui n'est pas occupée par de l'eau. Dans le cas d'un sol dont le drainage est librement assuré, cette teneur est donc, excepté dans une courte période après une pluie ou une irrigation, au moins égale à la macroporosité qui, de ce fait, représente une *capacité minimale pour l'air* ; elle est donc directement liée à l'humidité du sol, en particulier à son drainage. Dans le cas d'un sol à la capacité au champ, elle dépend de l'état structural et de la porosité grossière qui en découle. Toutefois, la teneur en air du sol ne suffit pas à définir un état d'aération. On doit prendre en considération sa composition en gaz carbonique et oxygène, et vraisemblablement en gaz réducteurs (hydrogène sulfuré, méthane, acides organiques volatils, etc.).

Cette composition en un point du sol résulte de l'équilibre entre les modifications engendrées par l'activité biologique du sol (évolution des matières organiques principalement), qui a généralement pour effet d'accroître la teneur en CO_2, et, dans les cas d'anaérobiose, en gaz réducteurs, et le renouvellement par échanges avec l'atmosphère extérieure. Ces échanges sont essentiellement régis par des mécanismes de diffusion.

Il s'ensuit que les principaux facteurs qui influent sur l'aération en un point donné du sol peuvent être rattachés à l'une des catégories suivantes :

— présence de matières organiques à évolution rapide (substances peu lignifiées, conditions physico-chimiques favorables à l'activité microbienne) ;

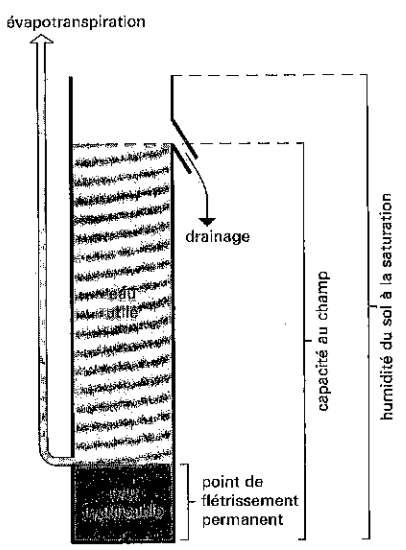
— facilité de communication avec l'atmosphère extérieure (profondeur, porosité, humidité).

Propriétés du sol et enracinement

La croissance du système racinaire est directement commandée, outre les conditions de température et d'aération que l'on vient d'examiner et diverses conditions chimiques ou physico-chimiques, par la configuration et par la rigidité de l'espace poreux.

En résumé, on peut considérer que la configuration des pores doit être compa-

fig. 2



Représentation schématique du rôle du sol comme réservoir d'eau (d'après R. Gras et S. Trocmé)

sol limoneux
profondeur utile = 150 cm
c = 21 p. 100
f = 9 p. 100
d_a = 1,6
R = 12 × 1,6 × 15 = 288 mm

sol sableux
profondeur utile = 100 cm
c = 8 p. 100
f = 3 p. 100
d_a = 1,7
R = 5 × 1,7 × 10 = 85 mm

sol argileux
profondeur utile = 60 cm
c = 35 p. 100
f = 15 p. 100
d_a = 1,4
R = 20 × 1,4 × 5 = 140 mm

tabl. 1 - *Exemples de réserve en eau des sols*

H < 20 % H = 0,51 A + 0,14 l + 7,35

H > 20 % H = 0,59 A + 0,16 l + 5,47

A : % argile (≤ 2 μ) ; l : % limon fin (2 à 20 μ)

tabl. 2 - *Relations entre l'humidité équivalente H (approximation de la capacité du champ pour les terres moyennes et lourdes) et la composition granulométrique du sol (d'après R. Gras)*

sol moyen	$45 \cdot 10^{-4}$
eau	$14 \cdot 10^{-4}$
air	$0,56 \cdot 10^{-4}$

tabl. 3 - *Conductibilités thermiques, en $cal.cm^{-1}.s^{-1}.K^{-1}$ (d'après C. Fabry)*

	pondérales (cal/g)	volumiques (cal/cm³)
eau	1	1
sable	0,19	0,51
argile.....	0,23	0,55
calcaire	0,21	0,55
humus.....	0,47	0,58

tabl. 4 - *Capacités calorifiques spécifiques des constituants du sol (d'après A. Demolon)*

LL	limons non dégradés argiles sédimentaires matériaux calcaires	LL = 0,621 A — 0,177 *l* — 0,078 S + 26,6 LL = 0,806 A + 26,6 LL = 0,984 A — 0,1229 *l* — 0,735 S + 59,9	CCM = 0,762 CCM = 0,746 CCM = 0,749
LIP	limons non dégradés argiles sédimentaires matériaux calcaires	LIP = 0,129 A + 0,057 *l* — 0,066 S + 24,6 LIP = 0,411 A + 0,279 *l* + 0,14 S + 2,9 LIP = — 0,562 *l* — 0,615 S + 54,2	CCM = 0,383 CCM = 0,645 CCM = 0,602
IP	sols peu organiques sols organiques	$IP = 48{,}9 \log_{10} \frac{A}{8{,}7}$ $IP = 51{,}5 \log_{10} \frac{A}{10{,}7} - 9{,}96 \log_{10} \frac{MO}{1{,}45}$	$r = 0{,}952$ $r = 0{,}863$

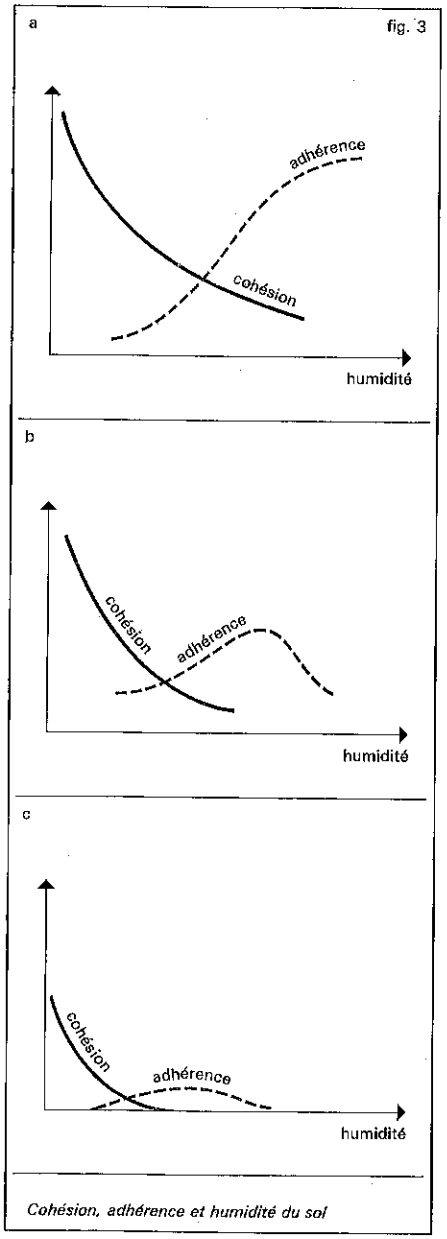
L : Limite de liquidité
LIP : limite inférieure de plasticité
LL — LIP = indice de plasticité IP

A : % argile ($\leqslant$ 2 μ)
l : % limon fin (2 à 20 μ)
S : sables totaux

MO : % matières organiques
CCM : coefficient de corrélation multiple
r : coefficient de corrélation

tabl. 5 - *Influence de la constitution du sol sur les limites d'Atterberg (d'après Rémy, 1971)*

tible avec les dimensions de racines de l'espèce végétale concernée, et cela d'autant plus que le matériau est plus rigide (sol sec ou sableux) et donc moins susceptible de se déformer sous l'influence des pressions axiales ou radiales de croissance des racines. On conçoit que la porosité d'origine structurale soit déterminante à cet égard, compte tenu de la dimension moyenne des racines des végétaux.



Cohésion, adhérence et humidité du sol

2 *Evolution de la structure*

Sous l'influence des facteurs climatiques, biologiques et mécaniques, la structure du sol est, on l'a dit, susceptible d'une évolution souvent rapide et profonde. Cette évolution peut se produire dans le sens d'une dégradation (diminution de la porosité structurale) ou d'une régénération (accroissement de la porosité). La constitution physique du sol (texture, taux de matière organique), sa composition ionique (cf. SOLS - Physicochimie) influent considérablement sur la stabilité structurale (résistance à la dégradation) et sur l'aptitude à la régénération de la structure (cf. SOLS - Amélioration et travail).

On dispose actuellement de tests éprouvés pour apprécier la stabilité structurale. Certains d'entre eux sont même interprétables en termes de facteurs responsables de ce comportement. C'est ainsi que le test de Hénin permet d'attribuer à la texture, à la teneur en matière organique et (ou) à la teneur en électrolytes la stabilité d'une terre donnée.

Pour ce qui concerne l'aptitude à la régénération, le plus souvent par des mécanismes de fissuration, bien que moins connue, elle paraît être sous la dépendance des mêmes facteurs jouant soit dans le sens de leur action sur la stabilité (texture, composition ionique), soit en sens inverse (matière organique).

3 *Propriétés mécaniques*

Au cours des opérations de travail du sol, qu'elles soient conduites en génie civil ou en agriculture, le résultat du passage d'un instrument dépend du comportement mécanique du matériau traité. Il en est de même des déformations du terrain dues aux roulages de véhicules ou d'appareils de traitement phytosanitaire ou de récolte, et de celles qui se produisent sous l'effet des pressions exercées par les racines lors de leur croissance.

Quelle que soit l'échelle à laquelle on se situe, la terre présente à cet égard des propriétés variables en fonction de sa constitution physique et de son humidité.

La principale de ces propriétés est la *cohésion* (fig. 3) :

— A l'état sec, la plupart des matériaux terreux sont *cohérents* ou encore *fragiles* : sous l'effet d'une contrainte, un échantillon se rompt sans avoir subi de déformation permanente notable ; dans cet état, la cohésion est le plus souvent maximale ;

— Au-delà d'une certaine humidité, variable suivant les sols, la terre devient *plastique* : il est alors possible de la déformer de façon permanente avant de la briser. La cohésion diminue fortement au fur et à mesure que l'humidité augmente ;

— Enfin, si l'humidité dépasse un seuil lui aussi variable, la terre tend à se comporter comme un *liquide* plus ou moins visqueux : la cohésion, bien que non nulle, devient très faible.

S. Atterberg a défini à l'aide de tests les humidités critiques que sont la *limite inférieure de plasticité* et la *limite de liquidité*. Bien qu'arbitraires, ces « limites d'Atterberg » sont actuellement le moyen le plus pratique dont on dispose pour prévoir le comportement d'un terrain en fonction de son humidité. Les régressions linéaires qui ont pu être établies entre les limites d'Atterberg et différents constituants des sols, et dont certaines sont présentées à titre d'exemple, illustrent l'influence de la teneur en argile et en matières organiques sur la position et l'étendue des domaines d'humidité correspondant aux différents états (tabl. 5).

Au cours de la réalisation des opérations aratoires (au sens large), une autre propriété intervient : l'*adhérence* de la terre à une surface métallique (fig. 3). Lorsque cette adhérence est excessive, l'opération devient impossible ou bien nécessite un effort de traction prohibitif. L'adhérence croît avec l'humidité jusqu'à un maximum dit *point d'adhésivité*, situé fréquemment un peu avant la limite de liquidité. Les terres argileuses ont une adhérence particulièrement élevée.

Enfin, la *sensibilité à la compaction* exprime la susceptibilité qu'a le sol de se déformer par rapprochement de ses constituants élémentaires, sous l'influence d'une pression qui lui est appliquée. Cette propriété présente une importance considérable aussi bien en génie civil, où l'on recherche des matériaux compactables et (ou) des humidités réductibles au maximum pour les assises de fondations, qu'en agronomie, où, au contraire, la compactabilité est un inconvénient majeur qu'on cherche à minimiser en n'effectuant les roulages qu'en dessous d'une humidité critique à laquelle la sensibilité du terrain est la plus élevée.

Les mécanismes de compaction, encore incomplètement connus, font intervenir un pouvoir de lubrification du système eau-argile qui facilite le réarrangement plus compact des particules limono-sableuses. Contrairement à une opinion courante, ce ne sont pas les terres argileuses qui sont le plus compactables, mais des matériaux limono-sableux ou sablo-argileux, dans lesquels la part de porosité texturale non liée à la phase argileuse est relativement importante.

Le choix des humidités favorables aux différents travaux repose sur une synthèse adaptée à chaque combinaison « type d'opération-texture du matériau ».

G. M.

Bibliographie et corrélats

Voir la bibliographie générale et les corrélats généraux, pages 138 et 139.

SOLS

4. Physico-chimie

Parmi les constituants des sols, les colloïdes argileux et humiques (cf. ARGILES ET MINÉRAUX ARGILEUX, HUMUS), étroitement associés, possèdent des propriétés d'échange d'anions et surtout de cations comparables à celles des résines échangeuses d'ions (cf. échangeurs d'IONS). La capacité d'échange, le pH et le degré de saturation en cations métalliques de cette capacité d'échange constituent des caractères importants des sols, lesquels sont également le siège de diverses autres réactions, comme celles d'oxydoréduction.

Constamment modifiée par l'alimentation des plantes et les apports d'engrais, la phase liquide du sol contient des électrolytes, et il en résulte des échanges continuels entre les phases solide (appelée parfois « complexe absorbant ») et liquide. Celle-ci se déplace sous l'effet de la transpiration des végétaux, et les flux ioniques qui en résultent s'ajoutent aux processus de diffusion pour amener au contact des racines les éléments nutritifs dont elles ont besoin.

Réactions d'échange

Echanges de cations

Les charges négatives du réseau cristallin des argiles n'étant pas totalement compensées par des cations appartenant à ce réseau, des cations « compensateurs », largement interchangeables, sont attirés et retenus à la surface des minéraux argileux. Ces faits, découverts par T. Way dès 1850, ont été peu à peu précisés et expliqués ; de même que l'échange intervenant dans une résine synthétique, ils peuvent être schématisés ainsi :

$$\text{argile Ca} + 2\,K^+ \rightleftharpoons \text{argile K} + Ca^{2+}.$$

Les grosses molécules constituant la matière organique relativement stable des sols, souvent appelée humus, possèdent pour leur part des fonctions acides faibles et des fonctions phénoliques susceptibles de s'ioniser au fur et à mesure de l'alcalinisation du milieu ; il en résulte des réactions assimilables elles aussi à des échanges :

$$\text{humus H} + Ca^{2+} \rightleftharpoons \text{humus Ca} + 2\,H^+.$$

Argile et humus étant intimement liés entre eux, c'est l'ensemble de leurs propriétés d'échange que l'on désigne par *capacité d'échange de cations* T. En raison de l'ionisation variable des fonctions organiques, elle est définie par rapport à un pH (pH 7, généralement) et peut varier en sols cultivés d'environ 50 à 500 milliéquivalents-grammes par kilogramme de terre selon la nature et la proportion des argiles et le taux de matières organiques. Par ailleurs, S étant la somme des cations métalliques, le degré de saturation V de la capacité d'échange

$$V = \frac{S \times 100}{T}$$

varie avec la teneur du sol en calcium actif.

Parmi les cations échangeables, on trouve surtout le calcium (notamment dans les sols formés sur roche mère calcaire), puis le magnésium, le potassium, le sodium et divers éléments-traces (Mn, Cu, Zn, etc.). Le fer, qui est présent dans les sols sous de multiples formes, peut également intervenir. Les ions H^+ tiennent aussi une place toute particulière : en effet, lorsque les cations métalliques sont insuffisamment abondants, les charges négatives sont compensées par des ions H^+, ce qui confère au sol un caractère acide que l'on apprécie le plus couramment par la mesure du pH des suspensions de terre, à l'aide de techniques bien définies. Les meilleures conditions agronomiques correspondant au voisinage de la neutralité, on remédie à une proportion excessive d'ions H^+ (ou Al^{3+} se substituant aux H^+) par le chaulage, c'est-à-dire par des apports de chaux ou de calcaire finement broyé (cf. SOLS - Amélioration et travail).

élément considéré	réserve du sol, échangeable ou adsorbée (kg/ha*)	teneur de la phase liquide (mg/l*)	transport par transpiration de 4 000 t d'eau (kg/ha)	besoins d'une culture (céréale) (kg/ha*)	importance du transport par rapport aux besoins
P	300	0,2	0,8	25	très insuffisant
K	600	10	40	120	insuffisant
Ca	6 000	200	800	75	très excessif
Mg	300	20	80	20	excessif

(*) ordres de grandeurs

Echanges d'anions

Les colloïdes du sol présentent un certain caractère amphotère qui se traduit, surtout en milieu acide, par la possibilité d'adsorption et d'échange d'anions. Ces réactions sont toutefois beaucoup plus limitées : les ions NO_3^- et Cl^- ne sont nettement retenus qu'en sols très acides ; SO_4^{2-} l'est assez faiblement ; le problème se pose surtout à l'égard des phosphates, qui font l'objet de multiples réactions avec les composés de fer, d'aluminium et de calcium. Le plus souvent, il ne s'agit pas à proprement parler d'adsorptions ni d'échanges, mais de formation de composés amorphes, évoluant avec le temps, dans lesquels les ions phosphoriques sont susceptibles de passer en phase liquide si celle-ci est suffisamment appauvrie sous l'effet de l'alimentation des plantes.

La phase liquide du sol

De manière générale, les constituants solides du sol sont constamment baignés par une phase liquide dont l'abondance dépend naturellement de l'état d'humidité. Souvent appelée « solution du sol », cette phase liquide renferme des électrolytes, notamment des bicarbonates provenant de la décomposition des matières organiques par les micro-organismes. A l'égard de l'alimentation des plantes, elle constitue la source préférentielle d'éléments nutritifs absorbés par les racines ; l'appauvrissement qui en résulte est compensé, au moins partiellement, par la désorption d'ions échangeables ou adsorbés. Le processus inverse intervient lors des apports d'engrais, qui, après dissolution, reconstituent les réserves du sol.

Des échanges ioniques continuels interviennent donc entre les phases solide et liquide, et, par des traceurs radioactifs, on peut apprécier à la fois leur vitesse et leur ampleur, c'est-à-dire la quantité d'ions participant aux équilibres sols-solutions, en distinguant les formes adsorbées ou échangeables des formes cristallisées.

Autres réactions physico-chimiques intervenant dans le sol

Outre les processus fort complexes d'insolubilisation et de dissolution des phosphates mentionnés ci-dessus, des réactions, dont les conséquences agronomiques sont comparables, interviennent à l'égard de certains cations : il s'agit de la rétrogradation et de la libération du potassium et de l'ammonium, qui sont susceptibles d'être fixés dans le réseau cristallin de certains argiles (illites, vermiculites) ou d'en être libérés par suite de l'élimination de formes plus labiles :

$$\text{minéraux argileux K du réseau} \overset{\nu_1}{\rightleftharpoons} \overset{\nu_1}{\rightleftharpoons} \text{K échangeable} \overset{\nu_2}{\rightleftharpoons} \overset{\nu_2}{\rightleftharpoons} \text{phase liquide} \begin{array}{l} \longrightarrow \text{plante} \\ \longleftarrow \text{engrais} \end{array}$$

Toutefois, ces réactions sont généralement beaucoup plus lentes que celles qui concernent les ions échangeables ($\nu_2 \gg \nu_1$) ; elles sont souvent largement réversibles.

Signalons enfin d'autres réactions telles que l'oxydoréduction : le fer et le manganèse sont beaucoup plus solubles et mobiles sous forme réduite (Fe^{2+}, Mn^{2+}) que sous forme oxydée, et leurs déplacements dans le sol dépendent à la fois du pH et des conditions oxydoréductrices, liées à l'aération du sol et à la décomposition éventuelle de résidus végétaux. Le manque d'oxygène peut également entraîner la réduction des nitrates et des sulfates et l'apparition de composés soufrés toxiques à l'égard des racines.

Conséquences relatives à l'alimentation des plantes et à la fertilisation

Le tableau indique la teneur approximative en éléments nutritifs adsorbables du sol et de sa phase liquide, ainsi que les quantités transportées vers les racines par le déplacement de cette phase liquide sous l'effet de la transpiration des cultures. L'approvisionnement de la rhizosphère en calcium et en magnésium ne pose pas de grand problème, mais il en va tout différemment pour le potassium et surtout pour le phosphore, dont se sont principalement préoccupés les physico-chimistes du sol, en tentant d'apprécier l'importance et la disponibilité des réserves.

Divers tests mis au point de manière assez empirique permettent de répondre aux problèmes agronomiques, grâce à la comparaison avec des expérimentations culturales. Mais il a fallu attendre l'utilisation d'isotopes tels que ^{32}P pour arriver à une meilleure compréhension des phénomènes et à une plus grande sûreté d'interprétation.

Actuellement, les recherches s'orientent largement vers l'étude à une échelle plus fine des processus intervenant dans l'alimentation : diffusion des ions vers les racines, relations avec l'état d'humidité du sol, modalités du transport par les déplacements de phase liquide, etc. Les principaux facteurs de ces mouvements d'ions concernent à la fois les propriétés intrinsèques de ceux-ci (mobilité, hydratation), celles du sol (tortuosité, capacité d'échange ou d'adsorption) et l'état du système, notamment sa teneur en eau, les concentrations ioniques dans les phases solide et liquide, et les gradients qui s'y établissent.

De manière générale, on peut donc dire que la physico-chimie des sols représente un monde fort complexe, où les échanges d'ions entre les constituants minéraux ou organiques et la phase liquide jouent un rôle prédominant. L'isolement et l'appréhension exacte des phénomènes sont souvent difficiles, en raison de la complexité du milieu ; mais des progrès importants ont été réalisés au cours des dernières décennies, notamment grâce à l'emploi des traceurs radioactifs et

d'autres techniques modernes de la physico-chimie.

R. B.

Bibliographie et corrélats

Voir la bibliographie générale et les corrélats généraux, pages 138 et 139.

SOLS

5. Amélioration et travail

L'aménagement d'un terrain agricole en vue d'une production déterminée consiste à mettre en œuvre différentes techniques qui visent, les unes, à amener les facteurs de croissance (eau, éléments minéraux) à un niveau convenable, les autres, à créer des conditions de milieu telles que la plante puisse utiliser au mieux les facteurs de croissance disponibles. Outre les techniques de fertilisation et de contrôle de l'eau (irrigation et assainissement) et éventuellement de lutte contre l'érosion, décrites par ailleurs (cf. EAU - L'eau en agriculture, ENGRAIS, SOLS - Erosion), on fait appel principalement à l'emploi d'amendements et au travail du sol.

Les amendements

Les amendements sont des produits, minéraux ou organiques, apportés au sol afin d'améliorer ses propriétés physico-chimiques, physiques et mécaniques.

Correction de la composition ionique du sol

La correction de la composition ionique du sol concerne, d'une part, des cations échangeables adsorbés par les argiles et les matières organiques (principalement Ca^{3+}, Mg^{2+}, K^+, Na^+ et H^+) et, d'autre part, des ions présents dans la solution du sol (cf. SOLS - Physico-chimie). Cette composition ionique commande à la fois le pH du sol et diverses propriétés physiques ou structurales du matériau.

Modification ou contrôle du pH

Bien qu'on puisse envisager des techniques d'abaissement du pH grâce à l'incorporation de soufre ou de certains amendements organiques, le but le plus souvent recherché est une élévation du pH ou un contrôle de l'acidification du sol. On a alors recours au *chaulage*.

Les amendements les plus fréquemment utilisés sont les marnes, les calcaires broyés, la chaux, la chaux magnésienne et, localement, le « maërl » et le « traez » bretons. Les doses dépendent de l'ampleur de la correction de pH souhaitée et de la constitution du sol. C'est ainsi qu'on peut estimer les quantités d'amendements (exprimées en kg de CaO/ha) nécessaires pour élever d'une unité le pH du sol à : 1000 à 2000 kg en terre sableuse, 2000 à 3000 kg en terre limoneuse (10 à 20 p. 100 d'argile), 3000 à 5000 kg en terre lourde ou humifère. Dans tous les cas, il peut être dangereux d'apporter des doses excessives d'amendements, qui entraînent des troubles de la nutrition minérale et favorisent le développement de certains parasites.

Correction des sols salés et sodiques

La présence de sel (ClNa) dans la solution du sol est toxique pour la grande majorité des végétaux. Par ailleurs, dès que la proportion de sodium dans la somme des cations échangeables dépasse 5 à 10 p. 100, les propriétés physiques et structurales du sol sont fortement dégradées. L'aménagement des terrains salés gagnés sur la mer (polders) ou ayant subi des apports intempestifs d'eau salée ou saumâtre consiste à éliminer le sel par l'établissement d'un assainissement adapté et à remplacer les ions Na^+ du complexe absorbant par des ions H^+ (on utilise alors du soufre élémentaire ou les acides organiques libérés par l'évolution de matières organiques enfouies) ou, plus fréquemment, par des ions Ca^{2+}. Dans ce dernier cas, on apporte du plâtre (SO_4Ca) à des doses variant de 2 à 6 t/ha suivant la quantité d'ions Na^+ à déplacer.

Correction de la constitution physique du sol

En dehors de l'*épierrage* traditionnel dans certains terrains caillouteux, on peut parfois procéder à des apports particulièrement riches en un constituant granulométrique pour corriger la texture d'un sol : le *marnage* combine un apport d'argile à un chaulage ; le *limonage* consiste à apporter des éléments fins en suspension dans les eaux d'irrigation (vallée du Nil, par ex.) ; le *colmatage* et le *warping* reposent sur le même principe, appliqué de façon systématique par sédimentation d'eaux boueuses sur le terrain endigué (amélioration des sols de Crau). Le *sablage* et l'*apport massif de matières organiques* peuvent être utilisés pour rendre des terrains médiocres propres à l'horticulture (terrains maraîchers de Loire-Atlantique).

Correction de la teneur en matières organiques

La teneur en matière organique humifiée d'un sol (cf. HUMUS) résulte d'un équilibre entre les pertes par minéralisation et les apports par transformation en humus des résidus de récolte et des amendements organiques (fig. 1 et tableau).

Le but des amendements est de maintenir cette teneur à un niveau satisfaisant. Les modalités d'apport (choix des amendements, date et technique d'incorporation) doivent permettre de tirer le meilleur parti possible des conséquences favorables de la transformation des matières fraîches apportées, tout en évitant certains accidents tels que l'apparition de conditions réductrices, le blocage d'azote minéral, etc. Les quantités nécessaires sont fonction du niveau organique que l'on souhaite obtenir ou maintenir, des restitutions « spontanées » des cultures de rotation et du rendement en humus (*coefficient isohumique*) de l'amendement choisi.

Le système constitué par les différents stades de la transformation entraîne un ensemble complexe de conséquences que l'on peut regrouper en trois chapitres principaux : les influences sur la dynamique des éléments fertilisants ; les influences sur les propriétés physiques ou mécaniques des sols ; les actions physiologiques spécifiques sur les végétaux, dont l'importance relative est fonction du type d'amendement et des conditions d'incorporation. Les *fumiers très décomposés* ont un rendement humique élevé ; ils apportent des quantités importantes d'éléments nutritifs, et en particulier d'azote. Leur action dans le domaine des propriétés physiques se manifeste à long terme avec une intensité modérée (fig. 2). Leur utilisation présente peu de risques d'accidents culturaux.

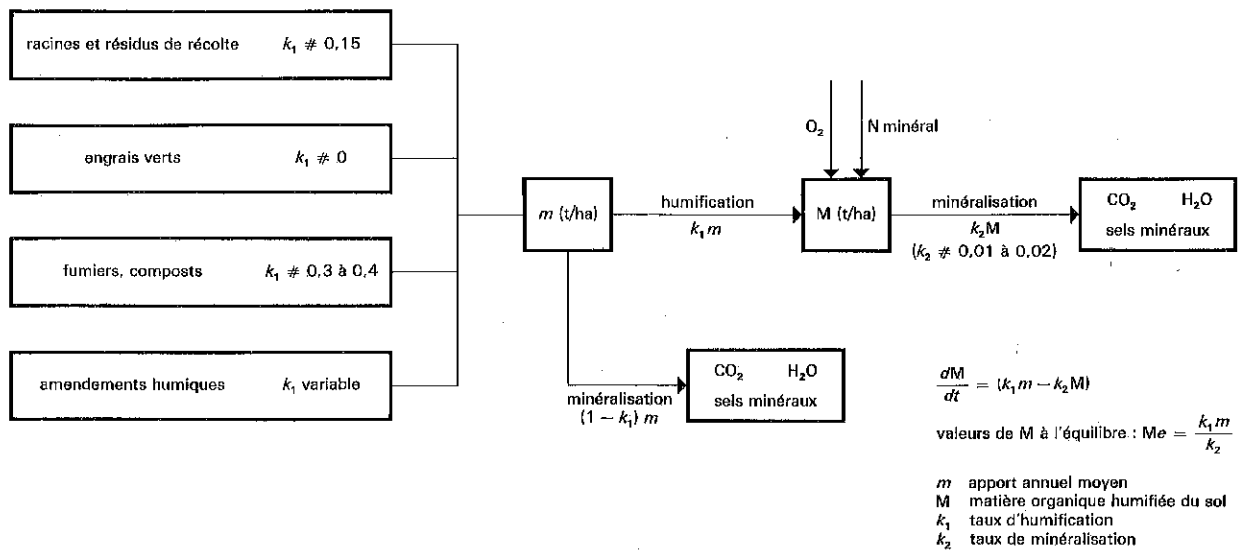
Les *engrais verts*, jeunes, peu lignifiés ont au contraire une action brutale mais limitée à la période de leur évolution (fig. 2) ; leur rendement humique est voisin de zéro. Leur emploi exige de grandes précautions.

Les *pailles de céréales* ont une action intermédiaire (fig. 2) ; de plus, leur faible teneur en azote nécessite des ajustements de fumure. Leur efficacité physique au cours de leur

type de sol	profondeur maximale de labour (cm)	poids de la couche arable (t/ha)	matières organiques (%)	stock d'humus (t/ha)	pertes annuelles (kg/ha)	exemples de rotations et amendements d'équilibre
limon blanc de Normandie	20	3 000	1,8	54	540	pomme de terre blé (paille enfouie) orge
limon rouge du Vexin	30	4 500	2,0	90	900	betteraves à sucre blé] (paille enfouie) orge] luzerne luzerne
terre de grole du Poitou	15	1 650	4,0	66	660	maïs blé] (paille exportée) orge] fumier (30 t/ha)
terre blanche sur craie de Champagne	20	2 800	4,0	112	1 120	maïs (cannes enfouies) blé orge prairie temporaire prairie temporaire prairie temporaire

Conditions culturales d'équilibre humique

fig. 1



Représentation schématique du bilan organique d'un sol

transformation dépend étroitement des conditions de leur incorporation (date suffisamment précoce, bon mélange à la couche labourée).

Le repos sous *prairie temporaire* conduit dans l'ensemble à une action « enveloppe » en durée et intensité des différentes actions précédentes (fig. 2). Son introduction dans la rotation est indispensable pour certains terrains, de texture et de situations climatiques ou culturales par trop défavorables. Le tableau indique les rotations et amendements d'équilibre humique de quelques types de sols.

Le travail du sol

L'état physique du sol résulte de l'interaction entre ses propriétés intrinsèques et différents facteurs extérieurs, d'ordre physique ou mécanique. De ces derniers relèvent les problèmes de travail du sol.

D'une façon générale, il s'agit d'aménager l'état du terrain tel qu'il est laissé par une culture pour le rendre apte à la culture suivante. Cela doit être réalisé au cours d'une période définie et dans les meilleures conditions économiques possibles.

Le terrain au départ peut être caractérisé par son état structural (compact, derrière betteraves ou maïs récoltés en conditions humides ; meuble, derrière pommes de terre, par exemple), la nature et la quantité de matières organiques à enfouir (partie de céréales, culture d'engrais vert), la nature et l'importance de la flore adventice, la présence de parasites animaux ou cryptogamiques. Enfin, la date de libération de la parcelle borne la période d'intervention et donc influe sur les conditions probables d'humidité dans lesquelles il faudra travailler le sol.

Parallèlement, il convient de définir l'état du terrain susceptible de fournir le meilleur support à la culture qu'on se propose d'implanter. Cela revient à faire la synthèse des exigences de la culture à ces différents stades : germination, enracinement, récolte. Ces exigences sont fréquemment contradictoires ; aussi, le choix de l'objectif procède-t-il nécessairement d'un compromis, qui, de plus, doit tenir compte du climat le plus probable et des risques particuliers attachés à la culture considérée.

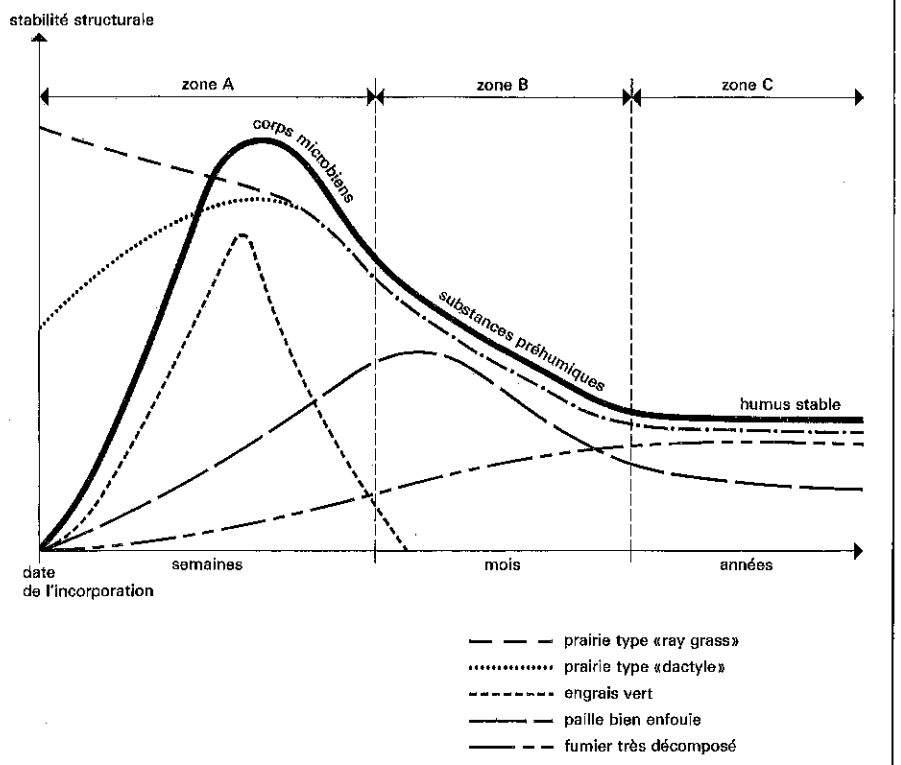
Les études fréquentielles climatiques étant encore rares et partielles, la décision prend implicitement la forme d'un pari dont la réussite dépend essentiellement de l'art du praticien.

Connaissant la situation de départ et l'objectif, le dernier volet du programme consiste à passer de l'un à l'autre dans les meilleures conditions possibles de rapidité et de prix de revient.

Pour cela, on dispose de la contribution éventuelle des facteurs naturels (alternances de gel et de dégel, de pluies et de sécheresse) et de toute une gamme d'interventions mécaniques : labour, quasi-labour, tassement par roulage. La succession des opérations est déterminée en tenant compte à la fois des actions spécifiques de chacune d'elles et des caractéristiques mécaniques du sol. Ces dernières — cohésion, plasticité, adhésivité aux outils, compactabilité — sont étroitement liées à la texture du sol et à son humidité du moment. De ce fait, il est extrêmement difficile de définir a priori la succession d'opérations culturales optimales pour une culture donnée, qui plus est dans certaines situations culturales (blé derrière maïs dans la moitié nord de la France, par exemple). Les possibilités de trouver le sol en bonnes conditions de travail sont suffisamment rares pour que se développent des techniques de non-travail du sol, rendues possibles par les progrès réalisés dans le domaine des herbicides.

G. M.

fig. 2



Stabilisation de la structure du sol par les matières organiques aux différents stades de leur évolution (d'après G. Monnier)