

Les sols et le maintien de leur fertilité en tant que facteurs affectant le choix de l'utilisation des terres

Ce document a été rédigé sur la base d'un projet présenté par G. Aubert (France), commenté et complété par Fournier (France), Rozanov (URSS) et par les secrétariats de la FAO et de l'Unesco.

INTRODUCTION

Le sol est un élément du milieu qui résulte de l'action, pendant un temps donné, de l'atmosphère et des biocénoses sur la lithosphère. Sa formation résulte d'une succession de processus de destruction ou de simplification, de réarrangements plus ou moins complexes et, pratiquement toujours, de réorganisations. Ces processus découlent de l'échange ou de l'absorption d'énergie issue de l'énergie solaire et de l'intervention d'agents atmosphériques, principalement des précipitations qui commandent l'humidité du sol.

Le sol est normalement un élément friable et agrégé. Grâce à son caractère de milieu perméable, pénétrable et oxydé, susceptible de s'hydrater et de s'échauffer, il permet à la vie microbienne de se développer et à la végétation de s'établir et de croître.

Les éléments minéraux des roches sont ainsi mis à la disposition des êtres vivants grâce à des processus divers où l'hydrolyse prend une importance particulière. L'intensité de celle-ci dépend essentiellement de la température à laquelle est porté le milieu, et du degré de circulation de la solution qui l'imbibe plus ou moins profondément.

La naissance du sol entraîne le développement des végétaux, qui permet celui des animaux à ses dépens, et de l'homme, dernier élément de cette chaîne.

Le sol joue ainsi un rôle essentiel dans tous les écosystèmes à la surface du globe terrestre.

Il exerce une action modératrice sur les variations des conditions de température et d'humidité dans le milieu biotique, alors que celles-ci, dans l'atmosphère, sont souvent irrégulières et brutales.

En pratique, le sol est indispensable à la vie de l'homme; celle-ci, pour des activités diverses, dépend de celle des animaux et des végétaux, qui, eux, ne peuvent se développer que grâce au sol lui-même. Les cas de vie prolongée

de l'homme, en dehors d'une utilisation plus ou moins directe du sol, sont rares. Cependant, les caractéristiques des sols ne leur permettent pas toujours de jouer pleinement, dans l'écosystème général, le rôle qu'on peut en attendre et ne les prédisposent parfois qu'à certaines utilisations à l'exclusion d'autres.

LE SOL ET SON UTILISATION

DIFFÉRENTES POSSIBILITÉS D'UTILISATION DES SOLS

Comme il a été indiqué ci-dessus, le rôle du sol dans le développement de l'écosystème général est primordial, puisqu'il permet la vie de l'homme, des animaux et des végétaux à la surface de la Terre, mais il varie considérablement selon l'utilisation qu'on peut en faire et suivant l'angle selon lequel on le considère. Sur un sol plus ou moins développé, une végétation prend place si les conditions climatiques le permettent. Elle peut procurer à l'homme des aliments, directement, ou indirectement après avoir servi à assurer l'alimentation d'animaux utilisés ensuite eux-mêmes par l'homme pour sa propre subsistance.

Sous sa forme la plus élémentaire, cette utilisation du sol consiste en la cueillette des produits de la végétation naturelle ou en la récolte, plus ou moins régularisée, de la faune sauvage.

Sous une forme plus évoluée, elle comporte la mise en place puis la récolte d'une végétation et d'une faune artificielles plus ou moins adaptées au but recherché et qui procurent à l'homme une masse alimentaire plus importante et de meilleure qualité que la végétation et la faune naturelles et, également, plus homogène et plus accessible.

Si l'on considère d'autre part l'utilisation indirecte du sol par l'intermédiaire des animaux, deux niveaux d'intervention sont possibles : utilisation de pâturages naturels à peine améliorés par des animaux domestiques de variétés peu sélectionnées ou des espèces sauvages, comme c'est encore trop souvent le cas en pays tropical, ou, à un niveau supérieur, mise en place d'un bétail aux performances très poussées sur des pâturages constitués d'espèces très productives.

Le sol peut également porter et nourrir une végétation dont les produits ont avant tout un intérêt industriel, soit direct comme les plantes à fibres pour les textiles, le chêne pour son liège ou l'hévéa pour le caoutchouc, soit indirect comme tant de végétaux dont les éléments cellulosiques peuvent être transformés en fibres synthétiques ou en pâte à papier, ou dont les produits peuvent procurer des éléments utiles si divers, selon les procédés les plus modernes de la chimie.

Sur de grandes étendues, l'utilisation du sol peut être de type forestier. Elle peut conduire à l'exploitation soit d'arbres de valeur pour donner des bois d'œuvre, d'industrie ou de pâte à bois, soit d'arbres sans propriétés particulières comme combustible ou pour la fabrication de panneaux de bois reconstitués. En ce qui concerne les bois d'œuvre et d'industrie dans la forêt dense (le plus souvent non aménagée) de la zone tropicale humide ou équatoriale, on se limite à la récolte des arbres de certaines essences et ayant atteint certaines dimensions. En conséquence, le rendement n'est que d'un arbre ou

tout au plus, dans les meilleurs cas, de quelques arbres par hectare, mais chaque unité est caractérisée par sa grande valeur. Dans la forêt tempérée aménagée, le nombre et le volume des arbres utilisables et abattus par hectare sont beaucoup plus importants. Dans l'un et l'autre cas, le sol qui porterait une plantation forestière entièrement constituée par l'homme donnerait une « récolte » plus abondante, plus homogène et plus accessible; et c'est la tendance actuellement suivie, notamment dans les zones tropicales. L'utilisation forestière des terres peut aussi conduire à la production d'arbres ou d'arbustes dont le bois, de moins bonne qualité, peut être plus ou moins transformé par divers procédés pour constituer des panneaux de fibres ou de particules très utilisés en construction. Ces mêmes arbres peuvent aussi fournir du bois de chauffage. On ne saurait trop insister sur l'importance primordiale de ce type d'exploitation du sol, par l'utilisation d'une végétation arborée ou arbustive de médiocre venue, comme en zone de savane tropicale. On peut citer des exemples de secteurs de mise en valeur agricole par culture irriguée où l'oubli du maintien de zones en végétation arbustive ou arborée, pour la fourniture du bois de feu, a été l'une des causes d'un demi-échec, les cultivateurs ayant trop longtemps utilisé le bois pour leurs besoins domestiques.

Il est indispensable que l'ensemble des végétations auxquelles le sol peut donner naissance soit équilibré, ce qui nécessite une certaine proportion de surfaces vouées à la forêt, à la culture et aux prairies ou pâturages. Cet équilibre est à rechercher pour diverses raisons :

1. Maintien des conditions climatiques et écologiques locales, qui paraissent dépendre en particulier de l'extension des surfaces boisées par rapport à la surface globale du secteur envisagé;
2. Action sur le bilan d'eau dans chaque bassin versant, bien qu'il soit difficile actuellement de préciser et de chiffrer l'effet exact que peut avoir sur ce cycle le maintien ou la disparition d'une surface boisée;
3. Protection du sol lui-même contre sa dégradation sous l'action d'agents atmosphériques (érosion par l'eau et le vent, influences thermiques intenses de l'atmosphère sur le sol).

Les bases mêmes de cet équilibre agro-sylvo-pastoral, qui peut d'ailleurs changer selon l'évolution des techniques et des investissements consentis, ne sont pas connues avec assez de précision, et de nouvelles études sont indispensables pour permettre de mieux les définir.

Le sol joue également un rôle important comme support d'une végétation et élément d'un paysage dont la valeur peut être grande pour l'homme sur un plan psychique, culturel, esthétique, récréatif ou touristique. Sous tous les climats, cette considération permet souvent d'apporter une solution raisonnable à l'utilisation de sols de trop faible fertilité pour pouvoir économiquement produire des récoltes utiles.

Le sol peut aussi dans certains cas constituer une source de certains matériaux, soit au même titre que les roches dont il dérive : sable, graviers, argile; soit à un titre plus spécial, si la pédogenèse a permis une concentration ou une apparition d'éléments utiles : terre à briques, cuirasses latéritiques servant comme minerais de fer, d'aluminium, de manganèse, etc.

Enfin, sur de grandes étendues, le sol est le support de bâtiments, d'établissements industriels, d'usines et de villes.

CONDITIONS DE CHOIX

Devant des possibilités d'utilisation si variées, l'homme doit sans cesse faire un choix en respectant les limitations dues aux conditions climatiques du lieu. Les bases de ce choix sont assez difficiles à préciser. On peut cependant conserver dans ce cas les critères de priorité qu'on admet souvent pour l'utilisation de toute ressource naturelle, et qui sont rappelés dans un rapport présenté par l'Unesco et la FAO au Conseil économique et social des Nations Unies (« Conservation et utilisation rationnelle du milieu », doc. E/4458, 12 mars 1968) : a) degré et urgence du besoin auquel correspond l'utilisation de la ressource envisagée, qu'il s'agisse de biens ou de services; b) satisfaction des besoins généraux d'un groupe de population; c) résultats à obtenir et efficacité probable des opérations à réaliser; d) permanence de ces résultats à long terme; e) coût de l'opération; f) effet probable sur d'autres activités de la population concernée, ou de pays voisins; possibilité d'extension ou d'extrapolation en d'autres pays.

Dans le choix entre les diverses utilisations possibles du sol en un secteur déterminé, il y a lieu de distinguer plusieurs cas.

Certaines utilisations sont très strictes et les qualités requises du sol font que les limites du choix sont très précises. Les produits recherchés sont indispensables et le type d'utilisation correspondant est prioritaire, même si une évolution peut se produire dans l'importance des surfaces à retenir à cette fin.

Tel est le cas de la production des aliments. Les rendements obtenus grâce à de meilleures méthodes culturales, à l'utilisation d'engrais, d'insecticides, d'herbicides ainsi que de variétés très sélectionnées ont considérablement augmenté durant ces dernières décennies, mais les quantités de nourriture nécessaires pour une population sans cesse croissante se sont accrues également. Si, dans les pays évolués, certaines zones autrefois cultivées sont maintenant réservées au tourisme ou à d'autres buts non alimentaires, ailleurs les surfaces utilisées pour produire des aliments s'accroissent sans cesse. Les nouvelles méthodes culturales ou l'extension de certaines méthodes déjà connues comme l'irrigation, en particulier avec des eaux plus ou moins salées, et l'obtention de nouvelles variétés mieux adaptées aux conditions écologiques locales peuvent permettre cet accroissement, mais ne doivent pas faire négliger l'intensification dans les zones plus favorisées. Cette ouverture de nouvelles terres doit être fondée sur des recherches préalables garantissant leur utilisation à long terme.

Ce qui précède s'applique également à l'établissement de cultures industrielles procurant des produits indispensables tels que coton, fibres de sisal ou d'autres plantes textiles, caoutchouc, etc. Cependant, les recherches entreprises un peu partout depuis des années permettent de remplacer ces produits provenant de la transformation de produits végétaux de cultures riches par ceux tirés d'espèces beaucoup moins exigeantes quant aux qualités des sols, ou encore par des produits tirés d'éléments dont l'origine n'est pas agricole (pétrole, huiles minérales, ou certaines roches). Leur caractère prioritaire tend donc à s'estomper.

L'utilisation du sol pour la production d'arbres de diverses espèces en vue d'obtenir des bois de construction, de menuiserie et d'ébénisterie, de mine ou de feu a pu longtemps être aussi considérée, quoique à un moindre degré, comme prioritaire. Si dans certains pays le bois a pu être remplacé par des

métaux, du béton, du pétrole, du gas-oil ou beaucoup d'autres produits, les perspectives de consommation sont encore nettement en augmentation, notamment pour les bois de pâtes à papier et les panneaux.

D'un point de vue économique, la production du bois reste encore prioritaire en beaucoup de pays en voie de développement soit pour l'obtention des devises nécessaires à l'importation de produits extérieurs, soit pour le ravitaillement des foyers domestiques. Reste prioritaire également, dans une certaine mesure — du moins pour certains pays — la production du bois de mine, qui n'a pu encore être remplacé par aucun autre matériau présentant les mêmes propriétés de rupture progressive et sonore.

Il faut reconnaître cependant qu'en dehors de toute préoccupation purement économique, qui fait que chaque pays doit tirer de son propre sol au moins une partie des produits alimentaires et industriels qu'il peut fournir et qui lui sont indispensables, le caractère prioritaire de ces utilisations du sol peut n'apparaître qu'à l'échelon mondial et non local, par suite des échanges possibles de pays à pays.

Dans d'autres cas d'utilisation du sol, le caractère prioritaire disparaît en chaque point pour être jugé à un échelon plus régional; les qualités mêmes des sols sont alors moins importantes, et l'extension des surfaces utilisées peut être très variable. Tel est le cas de l'établissement d'un système agrosylvo-pastoral équilibré, dans lequel la répartition entre chacune des soles peut varier assez largement.

Il en est de même pour ce qui est de l'utilisation des sols en vue de l'établissement de « paysages » nécessaires sur le plan spirituel, esthétique, touristique.

Des observations similaires s'appliquent enfin à l'utilisation du sol comme support des activités urbaines ou industrielles. La surface utilisée en fonction de celles qui sont disponibles peut être très variable. Les emplacements devraient être choisis, par exemple, de façon à n'empiéter qu'au minimum sur les meilleures terres de culture de la région.

LE MAINTIEN DE LA FERTILITÉ DES SOLS

LA NOTION DE FERTILITÉ

Un sol est fertile dès qu'il peut porter une végétation et, d'une façon plus pratique, dès qu'il peut produire des récoltes. Un sol véritablement infertile est très rare : sols à cuirasse latéritique ou croûte calcaire ou gypseuse très proche de la surface, sols très salés à alcali, certains sols podzoliques ou ferrallitiques chimiquement très déséquilibrés, etc. La notion de fertilité est donc essentiellement relative. En pratique la fertilité d'un sol est définie par l'ensemble des caractères et propriétés qui lui permettent de produire de façon continue des récoltes si les autres conditions nécessaires (climat, espèces végétales adaptées, pratiques culturales, etc.) sont prises en considération.

La productivité ne s'entend que pour l'ensemble complexe représenté par le sol dans son milieu naturel et utilisé selon les méthodes habituelles.

Pour être fertile et productif le sol doit permettre un bon développement des plantes. Il doit donc constituer un milieu suffisamment oxydé et ouvert au système racinaire et par conséquent être pénétrable, poreux, structuré,

sa structure restant stable. Dans un volume donné pénétré par le système racinaire, il doit fournir, en quantité suffisante pour assurer le développement des plantes et des cultures envisagées, l'eau et l'air en même temps que les éléments chimiques nutritifs dans une proportion correspondant, au moins pour certains d'entre eux, aux équilibres qui permettent une bonne dynamique des éléments et auxquels les micro-organismes indispensables et les cultures sont adaptés.

LES BASES DE LA FERTILITÉ

La fertilité des sols ne peut être définie que par un ensemble de caractères, l'influence de chacun d'eux sur la fertilité et les possibilités de production du sol dépendant de la valeur même des autres; en d'autres termes, il peut y avoir compensation.

Ainsi, en zone tropicale humide ou équatoriale, la production des cultures de caféiers ou de cacaoyers peut être la même sur deux sols présentant l'une une somme de bases échangeables inférieure à celle de l'autre si le premier possède une porosité supérieure permettant une meilleure circulation de la solution du sol. De même, pour conserver un degré donné de fertilité, le sol doit avoir une teneur en matière organique d'autant plus élevée que sa teneur en argile est plus forte. De tels exemples sont nombreux en toute zone climatique.

Par ailleurs, la répercussion des diverses propriétés du sol sur sa production dépend très largement des conditions écologiques du lieu où il se trouve. Ainsi, en pays tropical semi-humide comme dans le centre du Sénégal, le meilleur sol à arachides sera un sol ferrugineux tropical peu lessivé, très sableux (teneur en argile ≤ 6 à 7 %); en région un peu plus humide, comme au Tchad (pluviométrie annuelle : 800-900 mm) une teneur en argile de 10 à 12 % sera préférable; enfin, en région tropicale humide, un sol ferrallitique peu désaturé, faiblement appauvri en argile à sa surface, donnera les meilleurs résultats s'il présente 12 à 15 % d'argile dans l'horizon supérieur et 18 à 20 % en profondeur.

Chaque espèce cultivée possède aussi ses propres exigences. La canne à sucre, par exemple, nécessitera de fortes quantités de potasse utilisable dans le sol, alors que le caféier devra y trouver surtout, en plus de l'azote, de l'acide phosphorique et certains oligo-éléments.

L'eau

L'élément essentiel que doit pouvoir trouver dans le sol la plante cultivée est l'eau provenant des pluies, des inondations, des irrigations, ou même d'une nappe phréatique qui remonte. Cette eau doit pouvoir, le cas échéant, être mise en réserve dans le sol quand elle y parvient, pour être utilisée par le système racinaire des plantes au moment où elle sera nécessaire à ces dernières.

La possibilité globale de rétention d'eau par un sol dépend de la valeur de l'« eau utile » en chaque point des divers horizons, c'est-à-dire de la différence entre la quantité d'eau retenue au maximum d'humidité possible « au champ » et celle dite « du point de flétrissement », pratiquement constante pour un échantillon de sol, quelle que soit la plante qui y est cultivée. Elle

dépend en même temps des épaisseurs du sol affectées par les valeurs d'eau utile calculées.

L'évaluation de cette possibilité globale de rétention d'eau depuis la surface du sol jusqu'à sa base, au contact du matériau originel, ne présente pas de grosses difficultés. Deux éléments peuvent cependant, dans certains cas, rendre difficile la prévision de la quantité d'eau utilisable par les cultures au cours de l'année, même en présence des précipitations pluviales régulières d'une année à l'autre : *a*) le matériau sous-jacent au sol lui-même peut souvent servir de « réservoir » d'eau s'il est poreux et s'il n'y a aucune solution de continuité entre les deux : loess sous un chernozem d'Ukraine, craie sous la rendzine de Champagne en France; *b*) il est d'autre part indispensable que le système racinaire de la culture puisse atteindre, au moment voulu, le niveau où l'eau s'accumule (ou est retenue), ce développement du système racinaire dépendant largement des conditions thermiques du lieu.

Les études déjà en cours dans certains pays sur l'évolution du profil hydrique du sol et sur le développement du système racinaire des principales cultures au cours de l'année doivent donc être très largement développées. Elles sont à la base de toute recherche d'une meilleure adaptation des cultures (chaque espèce, chaque variété, sinon même chaque lignée ayant des besoins différents) aux conditions d'alimentation en eau qu'offrent les divers types de sol dans chaque zone écologique.

Si les valeurs d'eau utile varient assez largement en fonction des divers types d'argile, elles sont assez peu influencées par la teneur du sol en cet élément (entre 15 et 55 % d'argile). Par contre, elles dépendent très largement de la richesse en matière organique suffisamment décomposée et surtout en corps organiques intermédiaires entre la matière végétale proprement dite et l'humus stable. Encore faut-il que les conditions climatiques permettent au sol d'atteindre rapidement et de conserver un taux d'humidité supérieur au point de flétrissement : en pays semi-aride par exemple, un sol très humifère peut être un sol physiologiquement sec, et en zone tropicale aride, comme au Mali, les sols sableux sont les seuls à être adaptés à une culture pluviale parce qu'ils sont plus longtemps « agronomiquement » humides que les sols argileux voisins.

L'eau du sol ne sert pas seulement à l'alimentation de la plante en eau. Elle sert aussi à véhiculer, d'un point à un autre du sol, les éléments nutritifs nécessaires à la plante, processus qui facilite l'alimentation minérale de celle-ci. Aussi le sol, pour être fertile, doit-il être poreux et bien structuré. La richesse du sol en matière organique bien évoluée a une influence particulière sur ces caractères. Dans ce cas, en outre, les produits intermédiaires d'évolution de la matière végétale sont plus « actifs » que l'humus stable lui-même.

Les propriétés physiques

Structure nettement définie (moyenne à fine, et aux formes arrondies) et porosité sont aussi deux propriétés fort importantes pour la fertilité du sol, parce qu'elles y assurent une bonne circulation des gaz, en particulier O et CO₂. Si certaines cultures, comme le riz irrigué ou le riz d'inondation, peuvent pousser en milieu réducteur, la très grande majorité des plantes ne se développent bien qu'en milieu oxydant et aéré.

Les propriétés physico-chimiques

Les conditions physico-chimiques du sol (oxydo-réduction et réaction) exercent une très grande influence, non seulement de façon directe sur la croissance des cultures, mais aussi sur le développement de certains processus microbiens ou chimiques essentiels pour le développement des végétaux, en particulier l'évolution des produits organiques azotés, la solubilisation et la circulation des oligo-éléments, etc.

Les propriétés chimiques

Enfin, parmi les bases de la fertilité des sols interviennent leur teneur en divers éléments tels qu'azote, acide phosphorique, potassium, calcium, magnésium, sodium, soufre, oligo-éléments, etc., et la forme sous laquelle ils se trouvent. Il n'est d'ailleurs pas suffisant que ces divers éléments soient dans le sol sous une forme utilisable par les plantes, et en qualité telle que la culture puisse facilement absorber celle qui intervient dans la constitution de ses tissus, mais il est indispensable aussi, du moins pour certains d'entre eux, que divers équilibres soient respectés. Les équilibres entre anions et cations du sol sont très mal connus. Celui qui doit exister entre K et Mg sous une forme assimilable ou échangeable a été souvent observé, en particulier à propos de la nutrition des bananiers. Un autre équilibre s'est révélé très important : celui entre N et P, comme l'ont montré de nombreux agronomes et physiologistes, et il paraît indispensable de préciser dans quelle mesure — en fonction des conditions écologiques, des types de sol et des cultures envisagées — cet équilibre entre N et P ne doit pas être étendu également à S. En ce qui concerne les forêts, des épandages d'urée par voie aérienne, sur des peuplements de pins sylvestres en Suède, de phosphates sur pins en Australie ont nettement stimulé l'accroissement au cours de la période qui les a suivis. Des études plus poussées sur ces relations entre les caractères et propriétés des sols et la nutrition des végétaux, surtout des végétaux cultivés, sont indispensables. L'utilisation d'éléments marqués peut les faciliter. Celles qui ont été réalisées en diverses stations de recherches de la République fédérale en sont de bons exemples.

La connaissance que nous avons de l'influence des oligo-éléments contenus dans le sol sur le développement des végétaux cultivés est actuellement trop limitée. Cette action est pourtant, sans aucun doute, fort importante. On peut signaler, en particulier, parmi beaucoup d'autres, les effets spectaculaires observés dans certains cas par l'apport des corps suivants sur diverses cultures : Mn (céréales, en particulier avoine); Cu (maïs et hévéa); Zn (agrumes); Al (théier); Mo (légumineuses); Bo (betterave); Co (prairies).

Les relations entre oligo-éléments et cultures dépendent du type de sol utilisé et des conditions écologiques du lieu. De nombreuses recherches sont en cours sur ce point; elles doivent être encore très développées en particulier sur la dynamique de ces éléments dans les divers types de sol et en conditions écologiques différentes; l'importance pratique de leurs résultats peut être considérable.

L'ÉVOLUTION DE LA FERTILITÉ DU SOL AU COURS DE SON UTILISATION

Effets de la mise en culture

Trop souvent l'idée règne qu'un sol ayant un certain niveau de fertilité le garde naturellement tout au long de sa mise en valeur et de son évolution. Il n'en est rien et, même en culture pluviale, le remplacement d'une végétation naturelle par une végétation cultivée, accompagné de l'indispensable travail du sol, de l'apport de matière organique, d'amendements minéraux, d'engrais, de l'enlèvement des récoltes, etc., modifie nombre de processus d'évolution du sol. Cette transformation est encore plus nette en cas de culture irriguée où, en outre, la quantité d'eau qui imprègne le sol et qui percole à travers lui est très fortement accrue en des périodes où le sol est sec dans les conditions naturelles.

En règle générale, il faut, à partir du sol, fabriquer une terre cultivable. Un ou deux ans de culture en sol nu ou de travail du sol avec culture d'une plante de couverture sont nécessaires pour permettre la destruction des repousses, du système racinaire ou des plus grosses souches de la végétation précédente, et le tassement du sol ainsi que sa restructuration. En cas de sol très peu évolué (sur alluvions très récentes, sur fonds de marécage, etc.), une à trois années de culture d'une plante de couverture graminéenne (ou d'un mélange graminées-légumineuses) à système racinaire très profond, très dense et fin sont également nécessaires pour donner au sol la structure souhaitable et permettre à la vie microbienne de s'installer.

La première modification résultant de la mise en culture d'un sol précédemment occupé par une végétation naturelle est due à la mise en place d'un nouveau système racinaire. Celui de la culture n'occupe le sol que de façon temporaire. Il ne se développe que progressivement dans un sol en général dénudé lors des premiers stades de pousse des végétaux. Il pénètre presque toujours moins profondément, mais est parfois plus dense que celui de la végétation naturelle. Il en résulte une modification dans la masse et la répartition des résidus issus de la mort des systèmes de racines, ainsi que dans l'influence exercée sur les propriétés physiques du sol. De très fortes modifications interviennent également dans le cycle de remontée biotique des éléments minéraux; leur lixiviation par les eaux qui percolent peut devenir considérable (lorsque le sol est nu, en particulier). Ce phénomène est très net en région tropicale très humide, en sol ferrallitique cultivé, par exemple, en maïs, arachides et plantes à tubercules, où cette simple substitution d'un système racinaire par un autre provoque une perturbation considérable dans le cycle hydrique, dans le cycle organique et dans le cycle minéral du sol sur au moins un mètre de profondeur. En comparaison, l'exportation minérale par les cultures n'a qu'une importance limitée, au moins en pays suffisamment pluvieux et en sol bien drainant.

L'apport d'engrais vient en général compenser tout ou partie des exportations dues aux récoltes et normalement ne modifie que peu le sol, sauf parfois pour l'acidifier (emploi excessif d'engrais ammoniacaux). L'apport d'amendements minéraux ou organiques peut provoquer une transformation profonde et assez durable du sol, surtout s'il est renouvelé assez souvent au cours des siècles : l'emploi répété de fumier a par exemple donné naissance, dans de nombreux pays de vieille culture, à des horizons supérieurs très spé-

ciaux, « anthropiques », à humus abondant, bien évolué et lié, et riches en acide phosphorique.

Les pratiques culturales — retournement, labour, pulvérisation du sol — peuvent aussi modifier son évolution et sa dynamique. Accompagnant le remplacement de la lande par la prairie, elles ont, par exemple, transformé en Bretagne (ouest de la France) un sol podzolique ou un sol ocre podzolique en un sol dont la morphologie et la plupart des caractères sont ceux d'un sol brun acide.

Trop souvent, aussi, la mise en culture du sol est la cause du développement très rapide d'une érosion catastrophique. On ne saurait trop insister sur ce point sur lequel nous reviendrons plus loin.

Enfin, l'introduction de la culture irriguée provoque surtout les modifications les plus brutales : diminution — ou, dans quelques cas, accroissement — de la teneur en matière organique, dégradation de la structure et diminution de la perméabilité, lixiviation des éléments minéraux et acidification du sol, comme à l'Office du Niger, près de Bamako (Mali), où, en quelques années de riziculture irriguée, le pH de l'horizon supérieur du sol est passé de 6,2 à 4,7.

Évolution de l'épaisseur du sol

Dans tout écosystème, pour que le sol puisse jouer son rôle, il faut qu'il ait une épaisseur suffisante. Cette épaisseur critique est variable selon les zones écologiques et résulte de deux phénomènes opposés : l'approfondissement du sol par processus de pédogenèse et son amincissement par érosion naturelle.

Le premier ne peut se poursuivre indéfiniment. Il est fonction des conditions climatiques, biotiques, édaphiques et topographiques. Il peut aussi être bloqué par des « obstacles » tels que la formation d'une cuirasse latéritique ou même d'une croûte calcaire, ou par la présence dans la roche même d'un filon particulièrement résistant et plus ou moins horizontal : quartz, aplite, etc.

Le deuxième phénomène est lent lorsqu'il est normal, ce qui se réalise surtout sous une couverture végétale dense qui intercepte les gouttes de pluie et diminue leur énergie cinétique, amenuise et ralentit le ruissellement, accroît la percolation en maintenant une bonne porosité et une structure stable dans les horizons supérieurs du sol et peut « armer » la masse du sol, sur des profondeurs variables, par ses fortes racines.

La mise en culture provoque très souvent, malheureusement, une accélération de l'érosion. En 1956, la forêt secondaire de Côte-d'Ivoire, à Adiopodoumé, a perdu 2,4 t/ha de terre alors qu'au même lieu, sur une zone défrichée et cultivée en manioc, la perte en terre s'est élevée à 92,8 t/ha. En 1957, ces valeurs ont été respectivement 0,03 t/ha et 28,7 t/ha. En 1955, à Sefa (Sénégal), l'érosion sous forêt sèche s'est chiffrée à 0,02 t/ha alors que les terres ouvertes à la culture de l'arachide ont perdu 14,9 t/ha.

Les nombreuses études effectuées sur ce problème ont permis d'estimer assez exactement l'influence de chacun des facteurs du phénomène. La formule de Wischemeyer l'exprime bien et paraît très applicable non seulement aux États-Unis ou en Europe occidentale, mais aussi en Afrique tropicale et à Madagascar. Elle paraît moins exacte en Afrique du Nord. L'étude de cette question devra être poursuivie sur des parcelles expérimentales dont le type est maintenant très classique; elle se fera surtout grâce à des simulateurs de pluie, qui, s'ils ne sont pas encore parfaits, rendent cependant déjà de très grands services.

La lutte contre l'érosion et la conservation du sol reposent sur l'emploi de deux séries de moyens : a) des moyens « mécaniques », qui réalisent un contrôle du ruissellement, donc de l'érosion; b) des moyens biologiques, qui confèrent au sol une résistance accrue à l'attaque hydrique par l'entrée en jeu de la végétation et des pratiques culturales. Ces derniers sont fréquemment les plus importants.

Le contrôle du ruissellement s'effectue par la modification de la topographie au moyen de méthodes culturales adaptées (type et direction des labours) ou d'ouvrages dont le type est fonction de l'inclinaison de la pente : terrasses à large base de rétention (pentes $< 3\%$) et de diversion (pentes $< 12\%$), banquettes et gradins (pentes $< 12\%$), fossés d'infiltration, etc. Il peut également être réalisé par la disposition particulière de la végétation dans l'espace : cultures en bandes alternées, haies et bandes d'arrêt, enherbement des berges, clayonnages, forêts de protection. Il peut enfin résulter de l'amélioration des propriétés hydrodynamiques des sols (rôle de la matière organique, saturation calcique ou ferrique du complexe, stabilisation de la structure, etc.).

Mais l'homme, qui exploite le sol en produisant des végétaux, dispose également de moyens biologiques pour lutter contre l'érosion. Il peut en effet produire des végétaux de manière telle qu'ils protègent efficacement le sol contre l'attaque hydrique, et d'autre part utiliser les végétaux pour améliorer les propriétés du sol et lui conférer une résistance accrue. Il réalise alors une agriculture rationnelle en prenant en considération l'effet de la fertilisation des cultures, leur densité, l'époque des semis et des récoltes, les cultures associées et dérobées pour laisser le sol dénudé le moins longtemps possible, les plantes de couverture, les engrais verts, etc., et finalement les rotations. La mesure et l'étude de l'érosion éolienne ainsi que des moyens propres à s'en protéger posent encore de réels problèmes qu'il est pourtant indispensable de résoudre.

On doit garder à l'esprit que la méthode la plus efficace de conservation du sol repose surtout sur l'utilisation de pratiques agricoles rationnelles quant à leur nature, leur intensité et leur date d'exécution. Les opérations particulières de lutte contre l'érosion doivent parfaitement être intégrées à l'ensemble des opérations agrotechniques qui constituent le système cultural rationnel et conservateur adopté. La conservation des sols doit être réalisée aussi bien à l'échelle du champ et de l'exploitation qu'à celle du bassin versant.

Évolution des propriétés physiques du sol

La mise en culture d'un sol provoque très souvent la transformation de ses propriétés physiques. Il peut s'agir d'une dégradation par destruction des agrégats ou affaiblissement de la structure provoquant un tassement des éléments en un empilement compact. Ainsi apparaît et se développe la « semelle du labour ». Parfois, en particulier en pays tropical, à longue saison sèche, et surtout sur sols ferrugineux tropicaux lessivés, la dégradation est poussée plus loin, et tout l'horizon supérieur devient très dur, très compact et très cohérent dès qu'il est sec, et plus ou moins boueux quand il est humide.

La dégradation de la structure peut d'autre part être due à l'action de certains ions tel que Na et plus rarement K (le rôle de Mg dans ce sens n'est pas encore tout à fait élucidé, malgré les travaux faits au Canada, aux États-

Unis par le Salinity Laboratory, en France par l'Office de la recherche scientifique et technique outre-mer). Ils provoquent l'apparition d'une structure diffuse lorsqu'ils sont en quantité suffisante dans le complexe absorbant du sol. C'est en général pour une valeur de Na/T voisine de 15 % que cette modification de structure se produit, assez brutalement, comme cela a été montré aux États-Unis, aux Pays-Bas, etc. En pratique, elle peut apparaître pour des valeurs plus basses (jusqu'à 8 %) lorsque le complexe absorbant a une faible capacité d'échange (Mali, Australie), mais d'autres fois elle n'apparaît que pour des valeurs un peu plus élevées (18 à 20 %).

En sens presque inverse, la mise en culture peut provoquer, par dessiccation sous l'action directe de l'atmosphère, souvent après érosion de l'horizon de surface, un durcissement de composés du fer ou du manganèse préexistant dans le sol ou libérés lors d'une acidification culturale de celui-ci (vallée du Niari au Congo). L'horizon superficiel du sol peut alors se transformer en couches d'agrégats durcis (pseudo-concrétions) ou en une véritable carapace latéritique.

Une autre transformation, très fréquente en zone aride sous culture irriguée (par exemple au Maroc) ou en zone tropicale humide comme en Afrique occidentale, est l'« appauvrissement » en argile, limon, et parfois sable très fin, des horizons supérieurs du sol par érosion préférentielle en nappe et lessivage oblique subsuperficiel, après destruction des agrégats par la culture, puis semi-homogénéisation jusqu'à moyenne profondeur sous l'action de la faune du sol. Ce phénomène se traduit par un gradient textural progressif très important sur les 50 ou 60 premiers centimètres, sans accumulation d'argile en profondeur. Pratiquement connu depuis longtemps, il apparaît de plus en plus, depuis quelques années, comme étant très fréquent. Il peut se compliquer, semble-t-il — mais des études plus approfondies sont encore nécessaires — d'une dégradation des argiles des horizons supérieurs, soit par des produits organiques en pays tropical, soit par hydromorphie, ces deux phénomènes pouvant être accélérés par la modification culturale de la couverture végétale.

Tous ces phénomènes correspondent à une diminution de la fertilité du sol. Il est possible de lutter contre eux et souvent de les empêcher d'apparaître. La méthode la plus habituelle consiste en un bon travail du sol, parfois assez superficiel, sans pulvérisation trop forte de la couche supérieure. Une surface un peu motteuse est souvent préférable si la cohésion des mottes n'est pas trop élevée en saison sèche et si la taille des mottes n'est pas excessive.

Dans le cas de culture de vergers irrigués ou en région très pluvieuse, des méthodes de non-culture peuvent donner de très bons résultats. Elles comportent alors la coupe fréquente et la décomposition sur place de la végétation naturelle ou améliorée (légumineuses) entre les rangées d'arbres, et le nettoyage du sol seulement autour des arbres.

Parfois, à l'opposé, pour améliorer les propriétés physiques du sol, on est amené à faire un retournement complet du sol comme dans le cas des sols marrons, isohumiques, argileux ensablés de la région des Doukkalas au Maroc. Une telle opération, sous irrigation par gravité, accroît les rendements de betteraves de 100 % et des autres cultures dans des proportions également très élevées.

Enfin, la dégradation des propriétés physiques du sol par la culture est souvent causée par un développement d'engorgements hydriques ou une remontée de la nappe phréatique, en particulier en culture irriguée. Les méthodes d'assainissement ou de drainage, utilisées aussi bien aux États-

Unis et en URSS qu'aux Pays-Bas ou ailleurs, permettent de les éviter. Une condition essentielle pour limiter certains de ces processus est le maintien de l'état calcique du complexe absorbant contre un excès aussi bien de H que de Na.

Depuis des temps immémoriaux, les cultivateurs connaissent l'importance de la matière organique des sols : l'utilisation du fumier a permis de maintenir pendant des siècles leur fertilité en de nombreux pays, tant en Europe occidentale qu'en diverses régions d'Asie. Plus récemment, l'introduction d'une sole d'engrais vert enfoui — luzerne par exemple — a donné, dans un grand nombre de cas, d'excellents résultats agricoles. De nombreux travaux ont mis en lumière la très grande importance du maintien de la teneur en matière organique du sol au-dessus d'un certain seuil pour des raisons très variées, mais en particulier pour éviter la dégradation de ses propriétés physiques (structure, rétention de l'eau, etc.). Il est donc indispensable que, saison de culture après saison de culture, de la matière végétale, essentiellement cellulosique, puisse être décomposée dans le sol par voie microbienne. Si celui-ci est en bon état, la simple utilisation des résidus de culture permet de retourner au sol une quantité de matière végétale suffisante pour assurer le maintien de sa richesse organique. S'il est, au contraire, dégradé ou s'il possède de mauvaises propriétés physiques, il est indispensable d'améliorer d'abord ces dernières, soit par l'apport de fumier, soit par l'utilisation d'une prairie temporaire — l'ensemble « agriculture-élevage » constitue souvent une solution efficace au problème du maintien de la fertilité du sol, comme cela se voit par exemple en pays sérére, au Sénégal — soit par l'introduction d'une jachère de plus ou moins longue durée, comme cela a été expérimenté avec précision en de nombreuses stations agronomiques, telle celle de Yangambi, dans la République démocratique du Congo. La jachère comme l'emploi du fumier ont d'ailleurs aussi un rôle efficace en ce qui concerne les propriétés chimiques du sol.

Le problème du maintien de la matière organique est particulièrement important en culture irriguée. Cette dernière tend très souvent à provoquer une diminution de la porosité et une dégradation de la structure du sol. En favorisant le développement de la vie microbienne, elle tend aussi à assurer une plus forte décomposition de la matière organique du sol, ce qui accroît la dégradation physique de ce dernier.

Dans certains cas cependant, la teneur en matière organique du sol peut au contraire s'accroître par la simple culture irriguée. Les raisons de cette contradiction apparente relèvent non seulement du type de pratiques culturales utilisées, mais aussi de la richesse organique initiale du sol et des conditions climatiques de son évolution. L'essentiel à retenir est que le rôle de la matière organique sur le plan du maintien des propriétés physiques du sol au cours de son utilisation (aussi bien agricole que pastorale ou forestière) doit être envisagé comme dynamique et non comme statique.

Évolution des propriétés physico-chimiques du sol

Les conditions d'oxydo-réduction peuvent se détériorer dans le sol lors de sa mise en valeur, soit par suite de la diminution de sa porosité, soit par le développement des engorgements hydriques ou par une remontée de nappe phréatique, en particulier en cas d'utilisation par irrigation. Tout particulièrement sous ce dernier type de culture, il peut même apparaître des taches noires

de sulfures, plus ou moins étendues, notamment en riziculture inondée. Il peut aussi se produire une migration de composés réduits de fer ou de manganèse qui s'accumulent à moyenne profondeur, ce qui diminue la fertilité, comme en certaines zones d'Extrême-Orient. Maintien des propriétés physiques, drainage et assainissement, comme indiqué plus haut, permettent d'éviter ces phénomènes qui conduiraient à un abaissement très sensible de la productivité.

La réaction du sol varie très fréquemment au cours de sa mise en culture. Il peut se produire une alcalinisation, surtout en culture irriguée. Ce fait a été observé aux États-Unis (à Riverside), en Inde, au Pakistan, au Mali, en Algérie. Parfois, s'il se forme du carbonate de soude, le pH du sol peut s'élever à 10 et plus. Pour éviter de pareils inconvénients, là encore assainissement et drainage sont les premiers procédés à mettre en œuvre. Souvent on est amené à faire également des apports de gypse, de pyrite, de soufre ou même d'acide sulfurique très dilué, comme cela a été réalisé efficacement en Europe centrale et en URSS.

Une neutralisation de la réaction est un résultat classique et positif de bonnes pratiques culturales en pays de climat suffisamment tempéré.

La mise en culture peut provoquer en d'autres cas une certaine acidification du sol. En culture pluviale, en pays tropical humide, la remontée biotique des éléments minéraux étant très souvent plus faible sous culture que sous végétation naturelle, le complexe absorbant a tendance à se désaturer et le sol à s'acidifier. En République centrafricaine, de même que dans le Cameroun oriental ou au Congo (Brazzaville) sur sol ferrallitique, on a observé en quelques années de culture assez extensive une baisse du pH d'environ une unité. En zone équatoriale, le phénomène inverse peut se produire, le pH remontant de 3,5-3,8 sous forêt à 4,5-5 sous culture de caféiers, par exemple. La baisse du pH peut être plus rapide et plus forte en culture irriguée avec une eau très peu minéralisée. Quelquefois aussi le phénomène peut être accéléré, s'il se combine soit avec l'usage d'engrais ammoniacaux à haute dose comme ce fut le cas en Rhodésie ou au Kenya, soit avec une transformation des propriétés physiques permettant une percolation plus poussée. Ce dernier phénomène a été observé sur sol ferrallitique très argileux et très riche en manganèse, sous culture d'arachides dans la vallée du Niari, au Congo (Brazzaville). En quelques années le pH des 15 premiers centimètres du sol a baissé de 6-6,4 à 4,5-5. Cette acidification est d'autant plus grave qu'à ces valeurs 4,5-5 du pH des quantités importantes de Mn ou de Al deviennent solubles, qui sont rapidement toxiques pour les cultures. Ce fait a été observé en divers pays de l'Asie du Sud-Est. Un cas particulièrement grave d'acidification excessive du sol est celui des sols hydromorphes organiques salés, riches en sulfures, dont le pH s'effondre jusqu'à des valeurs de l'ordre de 2 lorsqu'ils sont drainés et s'oxydent. Ils sont alors pratiquement stérilisés, à moins que l'acide sulfurique et les sulfates acides formés ne puissent être lessivés par submersion ou neutralisés par un apport d'amendements calcaire ou calcique.

Une légère acidification peut, surtout en pays tropical, ne pas être nocive. Il faut cependant éviter une baisse trop forte du pH du sol : on y parvient grâce à diverses méthodes de chaulage et à un choix judicieux des engrais. Souvent l'utilisation de calcaires dolomitiques broyés peut être très efficace.

Propriétés chimiques

Les propriétés chimiques qui règlent la fertilité du sol sont modifiées par tous les modes d'utilisation de celui-ci. L'enlèvement des récoltes exporte chaque année une certaine quantité de matières minérales essentiellement prises au sol. Ainsi 3 tonnes d'arachides-coques contiennent plus de 200 kg d'azote, 100 kg de chaux, 70 kg de potasse; 225 tonnes de feuilles de sisal, près de 250 kg d'azote, 100 kg d'acide phosphorique, 500 kg de potasse et plus de 860 kg de chaux. Cependant, dans les cas précédents, la plus grosse partie de ces éléments minéraux ne se trouve pas dans la récolte elle-même, mais dans les résidus qu'elle peut laisser : tourteaux ou produits de défibrage. De tels « résidus » peuvent et doivent être retournés au sol. Dans d'autres cas, les éléments minéraux enlevés au sol font essentiellement partie de la récolte utilisée. Tel est le cas du blé dont 50 quintaux exportent au moins 130 kg d'azote, 65 kg de P_2O_5 , près de 80 kg de potasse et à peine 65 kg de chaux; ou du riz qui, pour la même quantité de paddy, contient environ 100 kg d'azote, 50 kg de P_2O_5 , un peu plus de potasse et 50 kg de chaux.

De toute façon, tant sur le plan de la richesse organique du sol, comme cela a été indiqué plus haut, que sur celui de sa teneur en éléments minéraux nutritifs pour les plantes, il est indispensable que la plus grande proportion possible des résidus de culture et des résidus de récolte soient retournés au sol. Cette règle devra être absolue s'il s'agit de sols assez faiblement pourvus en matière organique (ou la « brûlant » rapidement) et chimiquement pauvres, comme le sont beaucoup de sols évolués des régions tropicales.

A cet appauvrissement chimique des sols s'ajoute celui qui correspond à la lixiviation des éléments minéraux par les eaux qui percolent à travers eux jusqu'en dessous de la zone travaillée par les racines. En zone tempérée, ces exportations sont limitées sous culture. Dans un sol brun lessivé sur loess en région parisienne, il ne s'agit que de traces d'acide phosphorique et de très faibles quantités de potasse et de magnésium; elles peuvent atteindre 25 à 30 kg/ha de soufre et d'azote chaque année; elles dépassent annuellement, suivant les cultures, 100 à 200 kg/ha de chaux, mais elles sont beaucoup plus importantes en même zone sur sol nu. Sous des climats plus humides, ou en zone irriguée, elles peuvent atteindre des valeurs très élevées, même sous culture.

En pays tropical semi-humide, comme le centre du Sénégal, en milieu sableux, elles sont notables sous jachère ou en sol nu. Elles restent faibles en milieu plus argileux. Elles deviennent importantes sous de plus fortes précipitations. En Casamance (sud du Sénégal) les quantités de chaux ou de magnésium ainsi entraînées sont, pendant les premières années suivant un défrichement, de 12 à 20 fois plus fortes que celles exportées par les récoltes d'arachides qui y sont cultivées, de deux à cinq fois ensuite. La potasse y est proportionnellement moins entraînée.

En zone équatoriale cette lixiviation, très importante sous culture annuelle ou de faible durée, ou possédant un système racinaire peu profond ou moyennement profond (maïs, arachide, plantes à tubercules), est plus faible sous culture arborée pérenne (cacaoyère) et très limitée sous végétation forestière. Elle porte surtout sur la chaux, la magnésium, la potasse, etc. (exemple du Congo-Brazzaville).

Cet appauvrissement peut être très fort en cas de surirrigation, par suite de l'utilisation d'une eau salée ou d'un sol initialement salé.

En face de ces « exportations », il faut faire figurer les éléments rapportés lors de la culture. La décomposition de la matière végétale supplémentaire dans un sol normalement cultivé (débris de culture, résidus de récoltes, apport de fumier et de pailis, enfouissement d'engrais vert et de plantes de couverture, etc.) peut se substituer largement à celle de la végétation naturelle; elle libère des éléments azotés, phosphatés ou phosphorés, ou riches en soufre, et des cations tels que K, Ca, Mg, Na, etc. C'est là d'ailleurs un des rôles importants que joue l'apport de matière végétale dans le sol au cours de la culture.

L'apport d'engrais et d'amendements minéraux aide également à maintenir la richesse chimique du sol malgré son utilisation.

Lorsque le sol est très largement dépourvu d'un élément, on peut penser, pour améliorer sa fertilité, à faire des apports minéraux très importants, comme un véritable investissement pour « redresser » la constitution chimique du sol. En certains cas — zones peu arrosées, ou sols fixant les éléments (sols à hydroxydes pour ce qui est de l'acide phosphorique, sols à vermiculite dans le cas de la potasse) — l'opération est souhaitable; elle a été réalisée en de nombreux pays. En zones très humides et dans un sol fixant mal certains éléments, comme la potasse dans un sol ferrallitique peu humifère, surtout s'il est assez sableux, une telle opération paraît coûteuse et de faible efficacité.

Un autre enrichissement souvent important peut être dû aux éléments en solution, ou en suspension apportés par les eaux d'irrigation. Ceux contenus dans les sédiments ne peuvent pratiquement intervenir que si ceux-ci sont fréquemment (annuellement ou plus souvent) soumis à dessiccation et réhumidification, surtout en pays chaud. L'altération de ces dépôts peut alors être rapide, libérant les éléments nutritifs qui font partie de leurs minéraux. En zone irriguée, l'eau du Nil apporte 15 t/ha de sédiments par an; celle de l'Amou Darya 36 tonnes contenant plus d'une demi-tonne de potasse totale et 50 kg de P_2O_5 . Quant aux éléments nutritifs contenus en solution dans les eaux d'irrigation, leurs doses sont souvent très élevées (Ca, Mg, K), mais leur absorption par les cultures est fréquemment limitée par des doses beaucoup plus fortes de sodium. Parfois des éléments toxiques — borates, fluorures — sont apportés en excès au sol et aux cultures par cette même voie.

Enfin si, en pays tempéré, l'altération des minéraux originels contenus dans les sols n'enrichit ceux-ci que très lentement et très faiblement pendant le cours de leur utilisation agricole (encore que, dans certaines expérimentations agricoles de longue durée comme à Rothamsted en Grande-Bretagne ou à Grignon en France, ou dans certains cas de culture très intensive, ce phénomène paraisse jouer un rôle important pour le maintien des rendements) par contre, elle joue un rôle essentiel dans l'alimentation des cultures sur les sols des pays tropicaux humides, comme cela a pu être montré pour les cacaoyères sur les sols ferrallitiques du nord du Gabon.

Un cas particulier en matière de fertilité est celui de l'azote. Il est avant tout fourni au sol (puis par lui aux cultures) par la décomposition de la matière végétale. L'absorption de cet élément par certains micro-organismes — bactéries, algues — qui fixent directement celui de l'atmosphère, en constitue une autre source. L'azote est également transféré au sol par l'intermédiaire des légumineuses grâce au *Rhizobium* qu'elles contiennent dans les nodosités de leurs racines. L'utilisation, en grand, de ce processus permet dans certains pays (Nouvelle-Zélande) d'assurer l'alimentation azotée des cultures, presque sans emploi d'engrais azotés. Cependant l'azote libéré dans le sol peut aussi

être bloqué par des processus de réorganisation. Il est indispensable d'effectuer des études approfondies sur ce cycle de l'azote dans les divers types de sol et dans les diverses conditions de pédoclimats créées dans les différentes zones écologiques par des opérations de mise en valeur.

Développement de la vie microbienne

C'est surtout indirectement, en y provoquant des modifications dans les conditions physiques et physico-chimiques, que la mise en valeur d'un sol y modifie le développement de la vie microbienne dont l'influence est grande sur sa fertilité. Normalement, s'il est possible de régulariser ces caractères du sol comme il a été indiqué ci-dessus, les actions microbiennes doivent se développer dans le sens d'un maintien ou de l'amélioration de sa fertilité. Cependant, les études déjà entreprises doivent être poussées plus profondément et plus activement pour rechercher le moyen pratique d'activer ou de réduire, suivant les types de sol, des fonctions microbiennes essentielles comme la biodégradation du carbone organique ou la nitrification. Il en est de même pour les travaux qui concernent les différents organismes fixateurs, symbiotiquement ou non, de l'azote atmosphérique et en particulier les cyanophycées, si facilement utilisables en riziculture inondée.

Sur le plan des applications, d'ailleurs, une utilisation beaucoup plus étendue des procédés d'inoculation des graines des diverses espèces et variétés de légumineuses par des souches actives et adaptées de *Rhizobium* permettrait dès maintenant une amélioration très sensible de la productivité des sols sur de grandes étendues.

ÉVOLUTION DE LA FERTILITÉ DES SOLS DANS LE CAS D'AMÉNAGEMENTS GLOBAUX

Au cours de la mise en valeur agricole d'une zone, l'évolution de la fertilité de ses sols dépend, dans chacun de ses aspects, du type d'aménagement réalisé. On peut cependant en juger globalement.

Forêt

L'un des avantages de la forêt est qu'elle permet l'utilisation de certaines zones de sols très peu fertiles, trop sableux, trop acides, qui ne pourraient porter des cultures, ni même des prairies, de façon économique. En ce cas, l'intérêt de la forêt est qu'elle assure sa propre préservation en provoquant le cycle d'éléments chimiques qui lui est nécessaire.

Il ne peut s'agir là, le plus souvent, que de forêts de protection mises en place une fois pour toutes et qui ne fournissent directement que très peu de produits utilisables. Indirectement, ce type de végétation « rapporte » cependant beaucoup en supprimant ou en limitant l'érosion, dont les produits infertiles entraînés par ruissellement à partir de sols peu épais ou squelettiques risqueraient de recouvrir les sols des bas-fonds au pied des pentes, empêchant leur utilisation agricole (rizières en de nombreux pays tropicaux), ou compromettraient le fonctionnement des ouvrages situés à l'aval. Le système racinaire de la végétation forestière peut souvent pénétrer à travers les roches en désagrégation des sols peu épais, activant leur décomposition et approfondissant le sol lui-même.

Il faut également rappeler le rôle fréquent et important des forêts comme élément esthétique ou comme refuge de la faune. Cela est particulièrement vrai dans de nombreux parcs nationaux ou réserves de flore et de faune.

La forêt de production doit recouvrir des sols plus profonds, et suffisamment drainés, exception faite de certaines zones pouvant porter des forêts malgré un mauvais drainage (mangroves par exemple). Mêmes pauvres chimiquement, ces sols peuvent convenir s'ils sont assez profonds et pénétrables. Grâce à la protection contre l'érosion qu'elle assure par elle-même et par le sous-bois qu'elle laisse croître, et grâce à l'importance du cycle biotique de remontée des éléments minéraux auquel elle donne lieu, surtout en pays chaud et humide, la forêt parvient souvent à provoquer l'établissement progressif d'un équilibre assez stable entre elle et le sol. Son exploitation, surtout si elle se fait « à blanc », nécessite des précautions pour éviter l'apparition d'une hydromorphie néfaste, un appauvrissement chimique du sol et parfois une érosion brutale qui risque de gêner sa reconstitution ultérieure. Lors de son développement il faut éviter toute opération de « soutrage » qui consiste à retirer du sol sa litière forestière, car le « mulch » forestier joue un rôle important pour le maintien de la fertilité.

Au cours de l'évolution du sol forestier, sa fertilité risque cependant de diminuer par suite d'une lixiviation et d'une acidification excessives des horizons supérieurs, puis d'une dégradation des minéraux et argiles qu'il contient (podzolisation), sous l'influence des corps organiques acides d'évolution de l'humus grossier dû à une trop lente décomposition de la litière. Ce fait est particulièrement fréquent en pays de climat boréal ou tempéré humide sur roche acide ou en pays équatorial sur sable assez grossier ou gravier quartzeux. Cette perte de fertilité peut être très rapide et très accentuée sous végétation de conifères ou d'arbres dont les débris sont très riches en lignine et en tanin. Aussi une composition mixte de la forêt — feuillus, conifères — est-elle souvent à rechercher, quand elle est possible, malgré un rendement économique immédiat généralement un peu moins élevé.

Dans le cas des forêts fruitières (châtaigniers, noyers, noisetiers, etc.) il est nécessaire également de prêter attention à l'appauvrissement chimique consécutif à l'exportation d'éléments qui doivent être compensés.

En pays tropical humide, la forêt dense laisse une certaine érosion se produire par suite d'un ruissellement ralenti mais encore actif entre la litière végétale et le sol lui-même. Elle n'empêche pas non plus la perte de fertilité qui provient du phénomène de ferrallitisation, mais ce dernier est lent. La forêt représente dans ces régions la forme d'utilisation du sol qui en conserve le mieux les caractères de fertilité et en déséquilibre le moins l'évolution.

Enfin, il faut signaler le développement des plantations d'arbres, sur terres agricoles, le plus souvent fixées en rangées ou en rideaux et combinées avec des cultures vivrières ou industrielles. Les arbres bénéficient des engrais, du travail du sol et de l'irrigation destinés aux cultures et apportent à ces dernières une protection assurant une augmentation des récoltes. Certaines précautions sont cependant à prendre quant à leur espacement.

Prairie

La prairie, comme la forêt, assure une utilisation efficace des sols peu épais et souvent en pente, au moins si le climat est assez humide. Elle peut, à plus forte

raison, donner d'excellents résultats, sur sol profond et fertile. Il en est de même de la steppe en pays de climat continental semi-aride à subhumide. En climat aride elle est peu productive.

La prairie permet aussi, et peut-être surtout, d'utiliser efficacement des sols trop humides présentant des conditions réductrices plus ou moins poussées.

Bien développée, et dans des conditions climatiques appropriées, elle constitue la meilleure protection du sol contre l'érosion, sauf contre les sapelements et les mouvements en masse (glissements en loupes ou en écailles) et, dans certains cas, les grands ravinements. Bien entretenue, sur un sol dont le pH n'est pas trop bas (habituellement $\text{pH} > 5-5,5$) et dont le complexe n'est pas trop sodique ($\text{Na/T} < 12-15 \%$), elle permet en deux à quatre ans une amélioration très sensible de la structure de sols dégradés. Elle peut aussi, en fonction de sa richesse en espèces de la famille des légumineuses, enrichir le sol en azote.

Cependant, sous les climats chauds et très humides (plus de 3 000 mm de pluie annuelle, cas de nombreuses régions de l'Amérique tropicale), la prairie, quand elle n'est pas établie sur des sols particulièrement fertiles (alluvions, sols volcaniques récents), est généralement incapable de lutter contre l'envahissement par des plantes arbustives. Son établissement devient onéreux, sinon impossible, surtout si on ne peut recourir aux feux périodiques, difficiles d'ailleurs à utiliser rationnellement.

L'effet de la prairie sur la remontée biotique des bases est assez limité par suite d'un enracinement souvent insuffisamment profond. L'emploi d'une fumure minérale « de compensation » ou « d'entretien » n'en est que plus nécessaire.

Mise en valeur agricole

L'influence de la culture du sol dépend très largement du mode de mise en valeur adopté.

La culture pérenne d'arbres tels qu'hévéas, cacaoyers et palmiers ou arbres fruitiers peut être très conservatrice. Sauf dans le cas de l'établissement d'une cacaoyère en forêt dense par la méthode des layons, elle nécessite, au moins dans les premières années, une protection efficace du sol contre l'érosion : plantes de couverture ou par exemple culture « légumière » continue (y compris celle du bananier plantain en pays tropical) sont le plus souvent utilisées. Il faut cependant que le sol soit chimiquement assez riche et que l'alimentation en eau soit convenablement assurée soit par des pluies abondantes et pas trop irrégulières, soit par l'irrigation.

Un autre mode de mise en valeur agricole permettant d'atteindre assez sûrement un certain équilibre est le système des rotations. Bien comprise, la culture des plantes en rotation permet une utilisation rationnelle du sol, chimiquement plus complète, plus diversifiée, et s'étendant sur une plus grande épaisseur; elle rend possibles une semi-homogénéisation de celui-ci par les travaux culturaux à diverses profondeurs, une certaine remontée biotique des éléments minéraux nutritifs, et un maintien — parfois une amélioration — des conditions physico-chimiques d'oxydo-réduction et de réaction. Cette utilisation équilibrée du sol ne peut être atteinte que grâce à des apports importants d'engrais et, parfois, par l'addition de quantités limitées d'amendements.

La rotation doit être aménagée de façon à permettre l'intégration des procédés cultureux nécessaires pour conserver le sol contre l'action de l'érosion.

En pays tropical une méthode souvent employée est celle des cultures en mélange, préférée traditionnellement à la succession de cultures pures en rotation. Elle peut assurer une utilisation équilibrée du sol sur un mode assez extensif. Elle se comprend surtout en pays de pluviométrie irrégulière. Les différentes cultures mélangées ayant des besoins en eau différents, elle permet d'obtenir au moins un minimum de récolte chaque année. En pays très pluvieux, elle assure une meilleure lutte contre la lixiviation des éléments minéraux par une utilisation régulière, chaque année, d'une plus grande épaisseur de sol. Pour des raisons purement agrotechniques, cette méthode ne convient pas à la culture intensive, qui nécessite une certaine mécanisation, la défense des cultures contre leurs ennemis, insectes, champignons, etc., et l'emploi d'engrais adaptés à chaque espèce cultivée.

Les cultures industrielles hors rotation (fibres, fruits, légumes, etc.) posent des problèmes très différents. Dans certains cas, culture de sisal par exemple, elles occupent le sol de façon assez longue — huit ans et plus — mais elles ne le protègent pas toujours pour autant contre l'érosion; des procédés cultureux tels que terrasses à large base, n'empêchant pas le passage d'outils tractés, sont alors nécessaires. Ce type de culture semi-permanente leur est bien adapté. Habituellement de telles cultures ne sont possibles que sur un mode très intensif et ne sont rentables que si tout le système cultural permet une amélioration ou tout au moins le maintien des propriétés physiques et physico-chimiques du sol. Chimiquement, elles laissent souvent le sol un peu déséquilibré. Les études faites à ce sujet ne tiennent compte trop souvent que des besoins alimentaires de la plante et, sauf quelques exceptions remarquables, n'envisagent pas assez l'ensemble plante cultivée - sol. Plus qu'ailleurs il est indispensable de tenir compte aussi de la dynamique des oligo-éléments, exportés ou apportés par les traitements pesticides ou herbicides. Les recherches doivent aussi être activement poursuivies sur le devenir des produits organiques complexes répandus sur le sol par ces mêmes traitements.

Un dernier cas est celui des cultures irriguées. L'évolution des caractères de fertilité du sol y est d'abord soumise aux mêmes conditions que celles des cultures pluviales étudiées ci-dessus. Elle se complique cependant, en fonction du mode d'irrigation retenu (alimentation totale en eau ou alimentation de complément, aspersion ou gravité et ses variations) et des caractéristiques de l'eau d'irrigation quant aux éléments apportés en suspension ou en solution, ainsi que des volumes d'eau utilisés et de la cadence de leur emploi. Cette eau qui s'ajoute à celle due aux conditions naturelles du lieu a des effets variés, suivant les cas, sur la porosité et la perméabilité du sol, sur sa richesse en sels solubles — par rapport direct ou réaction des éléments contenus dans l'eau d'irrigation sur le sol — sur sa teneur en éléments minéraux nutritifs et en matière organique.

EXPRESSION DES CARACTÈRES DE FERTILITÉ DES SOLS

Les caractères de fertilité des sols, tels qu'ils ont été discutés ci-dessus, peuvent être connus et estimés de façon plus ou moins précise par les méthodes habituelles d'observation et de mesure sur le terrain, puis d'analyse d'échantillons des divers horizons de sols ou de végétaux s'y développant.

Ils peuvent être indiqués et interprétés pratiquement dans les notices des cartes pédologiques. Il est indispensable qu'ils le soient alors en fonction des diverses séries ou, au minimum, des différentes familles de sols définies par le type et le degré d'évolution (souvent type complexe dû à l'effet combiné de deux ou trois processus simultanés ou successifs) ainsi que par les caractères pétrographiques du matériau originel. Ils peuvent l'être aussi dans les notices des études régionales suivant les autres méthodes, plus ou moins complètement intégrées, fondées sur la reconnaissance des « unités de terrains » ou « unités de paysages » utilisées par divers écologistes en Australie, au Pakistan, etc., ou par les experts de la FAO en des pays aux terrains particulièrement complexes comme le Liban.

Des essais souvent fructueux ont été réalisés pour tenter de chiffrer le degré de fertilité des sols grâce à des indices se rapportant à divers caractères qui sont à la base de cette fertilité. Parmi les plus utilisés se trouvent celui de Storey, utilisé en Australie, et celui, plus complexe mais plus expressif, peut-être, de la réalité, mis au point par la FAO. Ce dernier fait intervenir huit facteurs édaphiques. Il tient compte, dans l'évaluation de chacun à l'intérieur d'une formule multiplicative unique, de l'influence qu'il peut avoir sur la fertilité et la productivité du sol en fonction des principales catégories de conditions écologiques et de grands groupes de types de culture. Les liaisons entre sols, climats et cultures étant encore assez mal définies et de toute façon très complexes, de tels indices ne peuvent rendre compte de cette complexité s'ils restent eux-mêmes trop simples mais, s'ils sont compliqués, ils deviennent alors difficiles à utiliser. Par ailleurs, quelle que soit la méthode de calcul retenue, elle peut permettre effectivement des compensations numériques qui ne correspondent pas à la réalité et qui peuvent donner une idée fautive de la fertilité d'un type de sol.

Il paraît souvent utile de reporter géographiquement, sur une carte, les résultats de ces études. Les cartes des familles ou des séries de sols, et celles des « systèmes de terrains ou de paysages » en sont déjà, comme indiqué ci-dessus, une première représentation. Il est aussi possible de cartographier les valeurs obtenues par le calcul des indices. Quoiqu'il en ait été souvent dit ou écrit, de pareilles représentations n'ont guère de valeur à petites échelles, telles que le 1/200 000 ou au-dessous. Elles prennent une réelle signification surtout au 1/20 000 et au-dessus. Pour une cartographie assez détaillée d'utilisation des sols on peut aussi définir des « classes de fertilité », comme celles utilisées par le Department of Agriculture des États-Unis. En Afrique, des cartes « d'utilisation optimale » des sols, à assez grande échelle, ont été dressées en de nombreuses régions, montrant la répartition des diverses classes de fertilité des sols et leurs subdivisions en fonction des travaux à réaliser pour maintenir ou améliorer cette fertilité, ou la répartition des types de sol en fonction de leur mode et degré d'évolution, de leur matériau originel et de leur profondeur, ou encore en fonction du type de leur recouvrement végétal, de leur pente et de leur degré actuel d'érosion.

Des divers renseignements ainsi portés sur ces cartes il est facile de déduire, en fonction des conditions climatiques, les aptitudes culturales les plus nettes de chaque région.

Il est aussi possible de dresser directement, à partir des cartes pédologiques elles-mêmes, des cartes d'aptitudes culturales des secteurs étudiés, en vue d'une culture pluviale ou d'une culture irriguée, les deux types d'aptitudes

différant très largement. Le second nécessite surtout de très bonnes propriétés physiques permettant une circulation facile de l'eau d'irrigation, mais le plus souvent pas trop rapide (sauf en cas d'utilisation d'une eau salée). Quelquefois on emploie l'expression « carte de vocation agricole — ou culturale — des sols ». Elle est erronée, car les possibilités d'utilisation des sols dépendent très largement des progrès réalisés dans la connaissance des sols et de la technique. Ainsi certains sols sableux, ou sablo-argileux, souvent podzoliques, ont été regardés longtemps comme inutilisables, sauf pour une forêt de conifères — et même pas toujours — en France, en Grande-Bretagne, en Australie, en Nouvelle-Zélande. Il n'en est plus de même depuis qu'a pu être découverte une carence en acide phosphorique ou en oligo-éléments : Cu, Mo, Zn, etc. Depuis, des remèdes ont pu être apportés, et l'utilisation culturale a été entièrement modifiée. Un tel fait est assez fréquent. Il n'empêche que de tels défauts sont toujours coûteux et souvent difficiles à corriger, et que les aptitudes ou limitations culturales de chaque sol sont bien dues à ses caractéristiques propres. Aussi les cartes pratiquement les plus utiles et les plus sûres présentent-elles la répartition des zones d'aptitudes ou de limitations pour des cultures déterminées.

CONCLUSION: LE CHOIX ENTRE LES DIVERS TYPES POSSIBLES DE MISE EN VALEUR

Une « autorité » qui cherche à utiliser toute parcelle de terre de façon à assurer le maximum de développement heureux pour la population et qui veut en même temps préserver les possibilités d'une telle utilisation dans l'avenir doit établir un choix quant au type de mise en valeur à réaliser.

Les remarquables facilités de communications que nous connaissons aujourd'hui permettent des échanges actifs et réguliers d'un pays à un autre et donnent à chacun la possibilité de ne pas produire directement les aliments, végétaux ou animaux dont il peut avoir besoin, mais de se les procurer en d'autres régions.

Néanmoins, il apparaît qu'un minimum d'aliments devrait être produit sur une partie du sol national, ou dans le cadre de l'activité nationale, tandis que, selon les possibilités, des produits destinés à l'exportation devraient être fournis soit directement soit indirectement par la mise en valeur du sol d'une autre partie du pays. C'est en tout cas très souhaitable sur le plan du développement économique et de l'indépendance économique de la nation.

Les choix effectués doivent préserver certaines zones ou certains secteurs dans leur état le plus naturel possible, pour maintenir les berceaux originels des espèces et variétés des divers végétaux et animaux existants, ou les représentants les plus typiques des divers groupements végétaux et animaux, complexes écologiques ou écosystèmes particuliers. Plus nombreux seront ceux qui pourront être ainsi conservés, plus faible sera la crainte de voir disparaître accidentellement des valeurs végétales ou animales naturelles, importantes et fructueuses pour l'humanité.

L'ensemble de ces réserves, intégrales ou autres, peut représenter au total une proportion non négligeable des terres. Mêmes augmentées de toutes les surfaces qui, par suite de la trop faible fertilité des sols, ne peuvent être utilisées sur le plan agricole et qui, pour d'autres raisons, ne sont pas retenues pour des

activités urbaines ou industrielles, elles ne représentent encore, le plus souvent, que des superficies de végétation naturelle insuffisante pour assurer l'équilibre agro-sylvo-pastoral nécessaire à chaque pays et la couverture végétale équilibrée de chaque bassin versant. Des zones plus étendues doivent être réservées à la forêt ou à la savane, à partir, normalement, des sols les moins fertiles. Dans de nombreux cas, les surfaces ainsi maintenues sous végétation naturelle, exception faite des réserves intégrales qui ne peuvent servir à de pareils buts, sont suffisantes pour satisfaire aux besoins touristiques, esthétiques et culturels des populations. Elles revêtent une particulière importance dans les régions de montagne ou de forte pluviosité, où elles jouent, en outre, un rôle régulateur dans l'écoulement de l'eau. Parfois, certaines zones doivent leur être consacrées, à cause de leur aspect, ou en raison des événements qui ont pu s'y dérouler ou encore parce qu'elles sont situées à proximité de grandes agglomérations urbaines.

Les types d'utilisation qui visent des cultures destinées à la consommation nationale ou à l'exportation nécessitent des sols suffisamment fertiles, ou faciles à fertiliser et dont le degré de fertilité peut être maintenu ou amélioré au cours de la mise en valeur. Aussi sont-ils normalement à choisir en priorité. A la base de ce choix, il existe bien entendu une décision politique faisant intervenir des considérations économiques et sociales. Parmi les considérations économiques figurent notamment la balance des paiements et les besoins en devises nécessaires à l'importation de biens d'équipement. Parmi les considérations sociales figurent les nécessités de l'emploi et l'alimentation des populations dans les zones surpeuplées ou difficilement accessibles.

D'autres facteurs de décision doivent être le coût réel de chaque opération et son incidence sur les autres secteurs d'activité du pays — petites ou moyennes industries de transformation par exemple — ainsi que la possibilité pratique et suffisamment aisée pour les populations de la région de s'adapter à chaque type de mise en valeur.

Il ne faut pas oublier cependant qu'en bien des cas la nature même des sols et leurs caractères de fertilité orienteront plus ou moins définitivement le choix vers telle ou telle utilisation agricole. Ainsi en région tropicale humide ou subéquatoriale, l'existence des sols ferrallitiques très désaturés, sableux ou sablo-argileux, très acides, conduira au développement d'une forêt de protection en topographie accidentée, ou à celui d'une forêt de production, ou à de grandes plantations de palmiers à huile, d'hévéas ou à l'établissement de certaines cultures fruitières pour l'exportation (ananas) plutôt qu'à celui de cultures alimentaires en rotation ou même de cacaoyères ou caféières.

Il est rare que, dans un pays donné, toutes les zones utilisables puissent être mises en valeur en même temps. Le choix entre zones fait intervenir les mêmes éléments de base que le choix des types de mise en valeur pour chaque secteur. Un élément de plus doit cependant intervenir. Il faut éviter les distorsions régionales, avec leurs conséquences politico-sociales, et maintenir un équilibre relatif dans le développement de chacune des régions en exceptant cependant, le cas échéant, celles qui sont trop peu peuplées.

Il est bien certain aussi que chaque gouvernement est obligé de faire entrer en ligne de compte le coût de la mise en valeur de chaque zone par rapport à la valeur des résultats à en attendre à longue échéance et la facilité plus

ou moins grande qu'il peut avoir à se procurer les crédits nécessaires pour les études préliminaires, puis pour la réalisation de ces aménagements, par exemple auprès des sources internationales de financement.

Les autres types de mise en valeur qui ne nécessitent pas les mêmes qualités de sols correspondent parfois à des implantations obligatoires : secteurs de mise en défend, de sous-végétation naturelle (forestière par exemple ou de savane), de protection, ou d'équilibres hydrologiques pour des bassins versants. Il en est parfois de même lors de la mise en réserve d'un berceau originel d'espèce, ou d'un groupement végétal donné, si la dégradation de la végétation naturelle est déjà très poussée dans la région. Un cas analogue sera celui de l'utilisation des terres pour les villes ou les établissements industriels ou pour les « espaces verts » qui doivent les accompagner. Cependant, en règle générale, le caractère prioritaire de ces types d'utilisation est moins strict que dans les premiers cas ou ne s'applique qu'à des surfaces beaucoup plus limitées.

Enfin, malgré toutes les difficultés que présente déjà, à un moment donné, le choix entre les diverses utilisations possibles des sols d'un secteur ou d'une zone, ce choix ne peut que se modifier dans le temps, par suite de l'évolution du marché des produits qui peuvent en être obtenus, par suite de l'évolution des besoins des populations concernées, par suite enfin des changements consécutifs aux transformations et aux progrès de la technique pédologique et agronomique, qui peuvent affecter les procédés employés pour l'utilisation agricole des sols, le maintien de leur fertilité et le développement de leur productivité.