

Note

# Le sol, maillon-clé de la gestion écosystémique de la biosphère anthropisée

Conférence présentée à Florence à l'occasion de la séance solennelle de l'« Accademia dei Georgofili » le 27 avril 2007

G. Pédro

Secrétaire Perpétuel Honoraire de l'Académie d'Agriculture de France

" **P**our bien situer dès le départ le cadre de mon intervention, je souhaiterais dire quelques mots à propos du thème que j'ai choisi de traiter.

Nous vivons sur la Terre, qui est jusqu'à nouvel ordre la seule planète du système solaire où se manifeste la vie et qui est, en outre, habitée par les hommes. C'est à la fois un privilège, mais aussi une lourde responsabilité. Les scientifiques de notre époque en sont conscients, puisqu'ils ont été récemment à l'origine de deux grandes initiatives :

- La première s'est déroulée en 2005, avec l'établissement dans le cadre de l'ONU, d'un bilan général conduisant à la publication d'un gros rapport sur l'état de la planète, dénommé : *Millennium Ecosystem Assessment (MEA)*, où apparaît pour la première fois la notion de « services écosystémiques ».

- La seconde a démarré cette année sous l'égide de l'ICSU (Conseil International des Unions Scientifiques) et plus spécialement de l'Union internationale des Sciences Géologiques et de l'Union internationale de la Science du Sol ; elle se traduit par la mise en place, en 2007-2008, d'une « Année internationale de la Planète Terre », dont l'objectif principal est de contribuer à l'amélioration de la qualité de vie des générations futures. Le pro-

gramme scientifique de cette Année internationale comprend 10 grands thèmes, dont l'un nous concerne plus spécialement ; il est intitulé : « Le sol épiderme vivant de la Terre<sup>1</sup> ». C'est ce qui m'a incité à développer ce sujet, et ce d'autant plus que les sols sont utilisés par les hommes depuis toujours et, en particulier, depuis le début de l'agriculture, mais sans que ces derniers se soient rendus compte qu'ils avaient affaire à un véritable « objet » de la nature. Ainsi pendant longtemps, les sols n'ont pas été à l'origine de recherches scientifiques. Même de nos jours, ils ne sont pas encore suffisamment considérés et restent par ailleurs assez peu intégrés à l'approche globale de type écologique, qui caractérise maintenant le fonctionnement de la biosphère.

Mais si j'ai choisi ce thème, c'est aussi pour rappeler que l'Association Internationale de la Science du Sol (aujourd'hui IUSS) a été créée à Rome en 1924, dans le cadre de l'Institut International d'Agriculture (Institut qui a été à l'origine de la création de la FAO). C'est là qu'un jeune ingénieur agronome de Paris, René Dubos, a débuté sa carrière. De ce fait, il a pu assister à la fondation de

<sup>1</sup> Terre ici veut dire terres émergées, qui ne représentent que 28 % de la surface de la planète, mais où s'épanouit le genre humain.





l'AISS et même participer -en tant que secrétaire- à la rédaction de la version française des statuts de cette nouvelle société savante internationale. Par la suite, R. Dubos est allé aux USA, où après avoir travaillé avec S. Waksman en microbiologie des sols et pris part à la découverte des antibiotiques (notamment dans ce qui était alors l'Institut Rockefeller), il a terminé sa carrière en s'intéressant aux problèmes d'environnement, avec les incidences que ceux-ci peuvent avoir sur les transformations des paysages naturels ainsi que sur la vie des hommes. C'est ce qui l'a conduit à mettre sur pied, en 1972, la 1<sup>re</sup> Conférence mondiale sur l'environnement qui s'est tenue à Stockholm avec le label : « Nous n'avons qu'une Terre ».

Tout ceci prouve qu'en partant de l'agronomie et des sols, il est possible d'appréhender beaucoup de problèmes fondamentaux qui concernent le genre humain ; et ceci est particulièrement marqué à une époque comme la nôtre qui est confrontée à deux nouvelles questions :

- La première a trait à la multiplication fantastique du nombre d'hommes sur la Terre : 2 milliards en 1900, 4 en 1975 et 6 en l'an 2000 ; et ce n'est pas terminé. Or, une telle situation risque de poser un jour prochain des problèmes d'alimentation, en sorte que les sols seront de plus en plus mis à contribution :

\* soit parce qu'on va être amené à mettre en exploitation des espaces naturels encore vierges, mais qui sont souvent considérés comme marginaux ;

\* soit parce qu'on sera conduit, en s'appuyant sur la science et la technique, à augmenter la productivité de sols déjà cultivés.

Jusqu'ou peut-on aller dans ces voies ? C'est là une première question que l'on doit naturellement se poser.

- La seconde est celle en rapport avec les changements climatiques annoncés qui, s'ils ont toujours existé au cours de l'histoire de la Terre et même de l'humanité, vont à l'avenir peser sur les problèmes de mise en valeur : déplacement des espaces terrestres à vocation agricole, ou encore modification du fonctionnement d'un certain nombre de types de sol. Tout ceci nécessitera des adaptations culturelles qu'on est loin de savoir résoudre à l'heure actuelle, habitués que nous sommes jusque-là à raisonner dans une relative stabilité biophysique.

En définitive, il est clair que l'homme a encore, plus que dans le passé, besoin des sols qui recouvrent les espaces continentaux, et c'est la raison qui nous pousse à bien connaître leur nature et surtout leur fonctionnement. D'où le choix de cette présentation qui se fera autour de trois points :

1- disposer pour les sols d'une doctrine scientifique solide qui permette de concevoir leur gestion de manière cohérente dans un cadre écosystémique. C'est l'approche biogéochimique qui servira de base ;

2- montrer comment, au cours du *temps*, les phases successives de l'agriculture ont pu peser sur l'évolution biogéochimique des sols naturels ;

3- envisager les problèmes biogéochimiques dans l'espace

et insister sur l'importance de la prise en compte de la diversité écopédologique des terres émergées, avant de préconiser leur mode d'utilisation agricole.

## LE SOL, PIVOT DU SYSTÈME BIOGÉOCHIMIQUE CARACTÉRISTIQUE DE LA SURFACE DES CONTINENTS

L'épiderme de la Terre constitue l'enveloppe externe de notre Planète, située entre l'atmosphère gazeuse et la géosphère solide. C'est le domaine de la *biosphère* où s'épanouit la vie, du fait des conditions biophysiques favorables qui y règnent, et de l'énergie lumineuse que celle-ci reçoit gratuitement, énergie qui est à la source de la photosynthèse. Or cette photosynthèse représente un phénomène de première importance, du fait qu'elle a permis le développement des *organismes chlorophylliens* qui sont à l'origine de l'expansion ultérieure des animaux terrestres (et notamment des herbivores), puis ultérieurement de l'humanité. Mais elle a conduit, par ailleurs, à l'explosion des *microorganismes* (hétérotrophes) qui, discrètement, jouent un rôle fondamental dans la disparition des résidus organiques s'accumulant après la mort des êtres vivants. L. Pasteur, grand spécialiste des microbes, l'a perçu très vite puisqu'il a écrit dès la moitié du XIX<sup>e</sup> siècle : « s'il n'y avait pas de microbes *dans les sols* qui recouvrent notre planète, la surface de la Terre serait encombrée de cadavres, de sorte que la vie serait devenue impossible ».

Mais, puisque la photosynthèse est une réalité et la prolifération des microorganismes une évidence, encore fallait-il qu'il existât, à la surface des continents, un milieu hydraté qui soit favorable au développement même des êtres vivants, à savoir un matériau meuble et poreux, qui puisse abriter des légions de microbes et qui, par ailleurs, se prête à l'enracinement des végétaux supérieurs, ceux-ci étant apparus sur les terres émergées dès le Dévonien (360 millions d'années) et les ayant envahies à partir du Carbonifère (280 millions d'années).

Il s'agit donc des sols qui sont les seuls objets de la nature à pouvoir assurer cette fonction, grâce à l'existence simultanée de 3 compartiments, à savoir des constituants minéraux à l'état divisé, des matières organiques et enfin des êtres vivants (faune tellurique et racines) qui sont en interaction constante ; d'où la mise en place de manière *permanente d'une circulation* des éléments chimiques entre ces compartiments, la matière organique des sols servant *d'intermédiaire* entre les composants minéraux actifs (c'est-à-dire possédant une capacité d'échange de surface, telles les argiles) et les organismes vivants : c'est ce mouvement général de type cyclique qu'on appelle le « cycle biogéochimique », étant entendu que ce cycle n'est jamais fermé, du fait des ouvertures susceptibles de se manifester à l'occasion vers d'autres enveloppes de la surface terrestre que sont l'atmosphère et la géosphère. Au total, les sols constituent donc, à la surface du globe, le pivot d'un système



dynamique, appelé système *biogéochimique*, sur lequel reposent tous les phénomènes qui se produisent dans la biosphère terrestre ; et c'est sur cette vision cyclique pilotée en partie par les lois de la chimie mais gouvernée surtout par le fonctionnement des êtres vivants qu'il faut dorénavant s'appuyer, si on veut bien comprendre l'évolution des sols naturels, puis si l'on souhaite maintenir les sols cultivés dans un état écologique satisfaisant.

A ce stade, il est bon de préciser que ce système cyclique met en jeu pour les divers éléments chimiques, 2 voies de circulation et d'échange qui sont distinctes, mais qui sont susceptibles d'intervenir simultanément ; la voie verticale (la plus courante) qui opère dans les 2 sens, entre la surface et la profondeur, et qui se fait au niveau du fonctionnement d'un *profil* ; la voie latérale qui, au contraire, concerne un espace naturel d'une certaine dimension correspondant à un écosystème, ou au moins à une portion d'écosystème, comme par exemple le bassin versant ou la toposéquence.

- De ces 2 voies, la voie de transfert verticale est la plus immédiate, car c'est elle qui recouvre les échanges « sol → plante » - (*dans les 2 sens*). Pourtant, elle n'a pas fait partie en toute plénitude du raisonnement des cultivateurs et des premiers agronomes, qui concevaient plutôt les relations du sol avec la plante de façon unidirectionnelle (sol → plante) et en s'appuyant, en outre, sur les seules lois de la chimie minérale. Ce sont, en fait, les forestiers qui ont été, en France notamment, les premiers à s'intéresser à la pédologie et qui sont à l'origine de la conception cyclique et de l'approche écologique des phénomènes de la biosphère ; et ceci à partir du constat suivant :

Comment peut-on obtenir, puis maintenir de belles forêts qui sont en général implantées sur des sols ingrats ? Or pour qu'une telle situation perdure, il faut qu'en dehors des retombées atmosphériques, les forêts contribuent elles-mêmes à leur alimentation minérale par l'intermédiaire des litières végétales qu'elles produisent chaque année et qui s'accumulent dans le sol. Naturellement, cela ne boucle pas à 100%, mais des études détaillées montrent que souvent 3/4 des éléments minéraux extraits du sol par les arbres – en tout cas toujours au moins les 2/3 - y retournent. Et ceci signifie que les arbres jouent un rôle fondamental dans le fonctionnement des sols et que cela peut être étendu à toutes les formations végétales naturelles – même si l'efficacité n'est pas toujours aussi évidente que pour une végétation arborée ; ceci, du fait de l'existence pour cette dernière d'un système racinaire développé sur une grande épaisseur qui est susceptible de puiser certains éléments nutritifs dans les horizons profonds et de les remonter ensuite au niveau du sol superficiel.

Au demeurant, cette voie verticale, qui a été tout à fait privilégiée dans la connaissance du fonctionnement des sols des parcelles cultivées et des problèmes agronomiques *sensu-stricto*, n'est pas suffisante, si l'on envisage les choses comme cela doit se faire au niveau d'un territoire. Il faut donc la compléter par une deuxième voie.

- Cette seconde voie est celle qui remplace les échanges à l'échelle de l'écosystème tout entier, c'est-à-dire de l'unité de base de la production de matière vivante. Elle recouvre donc la circulation des éléments qui se fait latéralement entre l'amont et l'aval d'une toposéquence (d'où la notion de « système-sol »), et aussi entre des bassins versants adjacents, par l'intermédiaire du réseau hydrographique qui les traverse. Dans ce domaine, ce sont plutôt les spécialistes de l'écologie qui ont été à l'origine de la prise en compte de l'approche spatiale des problèmes biogéochimiques.

En conclusion, le fonctionnement de la biosphère continentale repose sur la mise en œuvre d'un système biogéochimique à caractère cyclique dont le sol est le siège et qui doit constituer, de ce fait, la véritable épine dorsale de la Science des Sols. Or les sols ont été mis à contribution tout au long de l'histoire de l'anthropisation de la planète. Comment ont-ils réagi et comment les différentes phases de l'artificialisation agricole ont-elles pesé sur le fonctionnement du cycle biogéochimique naturel ? C'est ce que l'on va évoquer ci-après.

## CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES ET ANTHROPISATION - LES LEÇONS DE LA MISE EN VALEUR AU COURS DE L'HISTOIRE

Les écosystèmes naturels à la surface de la planète apparaissent, au cours du temps, en fonction des conditions climatiques et paléoclimatiques qui y ont régné, mais aussi de la nature des affleurements géologiques et des modelés géomorphologiques. Un système biogéochimique se met alors en place, système qui fonctionne de telle sorte que le recyclage soit le plus efficace possible ; c'est ce qui permet à la végétation naturelle de se renouveler spontanément et ainsi de se régénérer dans la continuité.

Au demeurant, les cycles en question sont différents, suivant qu'on a affaire à des massifs forestiers, à des systèmes prairiaux, à des steppes... ; mais, pour un milieu bioclimatique donné, on peut dire en bref que si la végétation *vit du sol, le sol*, au moins dans ses horizons organiques superficiels, *vit lui de la végétation*.

Il n'en est plus de même dès qu'il y a des exportations de matière (c'est-à-dire des prélèvements par l'homme), comme cela se produit lors de l'utilisation des sols par l'agriculture ; et ce, d'autant plus que les exportations sont généralement accompagnées d'interventions sur le sol, qui sont susceptibles de modifier les fonctionnements pédohydriques (façons aratoires, travaux d'assainissement...) et chimiques (fertilisation), avec toutes les répercussions biologiques qui peuvent en découler : régression de la faune, baisse de la teneur des sols en matière organique ...

Tout ceci est à l'origine de véritables « pressions biogéochimiques » sur les sols, qui vont être évoquées brièvement en se référant à l'histoire de l'agriculture en Europe, agriculture dont





l'évolution jusqu'à ces derniers siècles –il est bon de le préciser– s'est toujours faite de manière très progressive. Notons ici que l'interprétation biogéochimique qui va être présentée résulte d'une analyse *a posteriori* des transformations mises en œuvre, puisque jusque dans les années 1950, et souvent bien après, les cycles biogéochimiques n'étaient scientifiquement pas intégrés à l'étude du fonctionnement des sols cultivés.

*Grosso modo* et suivant un schéma désormais classique, on peut distinguer 5 phases que nous allons brièvement passer en revue.

- Dans la 1<sup>re</sup> phase, qui est celle de *l'agriculture itinérante*, seuls quelques espaces forestiers restreints sont défrichés –et encore grossièrement–, puis incinérés ; ils sont ensuite mis en culture durant quelques années, avant d'être abandonnés. Naturellement et de façon temporaire, il y a appauvrissement du milieu, mais le retour progressif d'une végétation spontanée réamorçait le système biogéochimique qui va retrouver son état d'équilibre lorsque la forêt sera reconstituée, c'est-à-dire au bout de 25 à 30 ans. C'est le système dit de la jachère longue.

- Au cours de la 2<sup>e</sup> phase (*agriculture primitive*), qui est celle de la *société sédentarisée* de l'Antiquité et du 1<sup>er</sup> Moyen âge, la pression sur le sol devient permanente. Toutefois, elle reste modérée en relation avec une culture manuelle et du fait de l'adoption des jachères courtes (1 à 2 ans). Ceci explique que le sol –en dehors des cas où se manifestent des phénomènes érosifs– conserve ici toute son intégrité physique et biologique. Au plan chimique, il y a cependant à la longue un certain appauvrissement ; mais, comme la productivité demeure très faible, le système biogéochimique reste à ce stade assez peu modifié.

- La 3<sup>e</sup> phase, qui va du Moyen âge féodal au milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle, est celle de *l'agriculture traditionnelle* reposant sur l'utilisation de la charrue en culture attelée. La pression sur les sols est alors plus nette, mais on ne bouleverse pas encore trop le cadre biogéochimique grâce aux apports réguliers de fumier de ferme et à la pratique des assolements ; même si, avec le temps, un épuisement des terres en certains éléments (phosphore notamment) commence à se faire sentir.

- Dans la 4<sup>e</sup> phase qui se situe dans le cadre de la *nouvelle agriculture*, depuis la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle jusqu'à la 1<sup>re</sup> moitié du XX<sup>e</sup> siècle, la pression sur les terres arables devient plus élevée, en relation avec le développement de la culture motorisée ; celle-ci provoquant à la fois un amoindrissement du compartiment biologique des sols et une diminution de leur teneur en matière organique. Mais dans le même temps, la fertilisation de type scientifique, basée sur les lois agrochimiques qui constituent à ce moment là le seul domaine des recherches sur les sols, se généralise tout en restant modérée (apports  $\leq$  besoins) : fertilisation organique naturellement avec le fumier provenant des exploitations d'élevage et fertilisation minérale découlant de l'apport –encore timide– d'engrais, d'abord naturels, puis de synthèse.

A ce stade, le système biogéochimique n'est pas trop perturbé, en sorte que l'intégrité reste en gros assurée. Mais l'appauvrissement au niveau de la parcelle devient ici plus net, la production, donc les exportations, ayant augmenté dans le même temps ; au demeurant, on se situe encore dans un cadre naturel, surtout quand on envisage les choses à l'échelle des territoires ruraux.

- La 5<sup>e</sup> phase commence vers 1950 ; c'est celle de *l'agriculture moderne* mécanisée qui va de pair avec l'adoption de monocultures répétitives, caractérisées, entre autres, par des fertilisations plus intensives (qui dépassent les besoins des plantes) et par de nombreux traitements phytosanitaires, tout en comportant de longues périodes où les sols restent nus. Ce mode d'agriculture conduit à des productions très élevées, en tout cas jamais atteintes jusque là, mais il correspond à une artificialisation du milieu qui, tout en coûtant cher en énergie, se fait sans se préoccuper du système biogéochimique, comme si l'homme avait décidé de se passer de la nature ; d'où toute une série de dysfonctionnements qui se traduisent, soit par une accumulation de certains éléments dans le sol pouvant atteindre des seuils de toxicité, soit par une perte de certains autres au cours du lessivage, du fait que ceux-ci étant en excédent, ne peuvent être recyclés par voie biogéochimique, et ce avec tous les problèmes susceptibles d'apparaître alors au niveau de l'environnement. Mais il faut indiquer en outre que, dans le même temps, le sol se compacte et devient inerte en perdant peu à peu les qualités qui en faisaient le pivot de la biosphère.

Certes, les agriculteurs ne sont pas seuls responsables de cet état de choses ; ils ont souvent appliqué à la lettre des méthodes prônées par la science agrochimique, qui ne s'appuyaient que sur les lois de la chimie minérale, sans se préoccuper beaucoup du sol et surtout sans prendre en compte ses fonctionnalités biologiques ; d'où une dégradation inéluctable des terres cultivées, même sous nos latitudes moyennes<sup>2</sup>.

Au total, tout ceci peut être rassemblé en mettant en exergue 3 grandes étapes au sujet du rôle de l'homme dans l'anthropisation de la nature.

a- L'agriculteur prend, après défrichement, le milieu tel qu'il est et, en gros, touche assez peu au cycle biogéochimique naturel. Les cultures fonctionnent alors à la manière des forêts naturelles, même si leur rythme de croissance est différent (phases 1 et 2).

b- L'agriculteur, souhaitant une meilleure productivité, modifie quelque peu le cycle naturel, mais sans le rompre. A ce stade, la nutrition reste encore assurée en priorité par le sol, qui demeure en tout état de cause le *régulateur fondamental de la biosphère terrestre* (phases 3 et 4).

c- L'agriculteur, aveuglé par les nouvelles possibilités techniques, se préoccupe peu du sol et peu aussi des problèmes

2 : Cette attitude scientifique basée sur les seules disciplines de base qui étaient déjà bien assurées, n'est pas propre à l'agrochimie ; elle a atteint aussi beaucoup d'autres secteurs. Le cas de la régulation des cours d'eau ne faisant appel qu'aux lois de l'hydraulique en est un autre exemple.



d'énergie (phase 5). Il en arrive ainsi, par ses pratiques, à rompre le cycle biogéochimique, à négliger les services écosystémiques de la nature et à produire des nuisances environnementales ; cela revient en définitive à se passer du sol, qui devient alors un simple support et qui a pu être considéré par certains comme un « mal nécessaire » (Y. Coic, 1952).

Il est donc grand temps de retrouver la nature et de prôner une agriculture moderne, qui soit productive dans toutes les régions du monde (nations industrialisées et pays en développement), mais qui soit aussi « biogéochimiquement contrôlée » (La Révolution Doublement Verte rentre dans ce grand ensemble). C'est, semble-t-il, la seule façon de continuer à utiliser les sols (ce qui est une nécessité pour l'alimentation d'un monde de plus en plus peuplé), mais sans en abuser.

Ceci ne veut pas dire que tout soit simple ; en vérité, cela ne l'est pas du tout, car si le principe biogéochimique reste universel, les sols à mettre en valeur sur la planète sont très variés, en sorte qu'ils ne peuvent supporter qu'un mode d'artificialisation qui leur soit adapté ; et ceci conduit au troisième point.

## CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES ET DIVERSITÉ ÉCOPÉDOLOGIQUE DE LA PLANÈTE

Comme cela a été déjà souligné, le type de fonctionnement biogéochimique est le même à la surface du globe, quels que soient les milieux terrestres où règne la vie, à savoir un recyclage permanent des éléments ayant participé à cette vie ; d'où le nom de « cycle biogéochimique » qui lui a été donné.

Au demeurant, un tel cycle peut :

- 1- fonctionner plus ou moins vite suivant les conditions pédo-climatiques ;
- 2- intervenir sur une plus ou moins grande épaisseur ;
- 3- être plus ou moins ouvert vers l'extérieur.

Tout cela dépend des conditions pédoclimatiques que l'on rencontre à la surface du globe. De ce point de vue, on peut se limiter aux 3 principaux domaines, à savoir :

- Les zones tempérées où la vitesse de recyclage se fait à un rythme *modéré* et où les sols ont une profondeur de l'ordre *métrique* ;
- Les zones tropicales humides où le cycle biogéochimique est très *actif* et où les sols sont très épais (ordre *décamétrique*) ;
- Les zones arides et semi-arides ayant un cycle biogéochimique, à la fois *lent et discontinu* et où les sols sont *superficiels*.

### Zones tempérées

Après l'apparition de l'agriculture dans les aires subarides du Moyen Orient (Croissant fertile), celle-ci a pris son plein essor en

Europe occidentale, notamment dans les zones à forêts de feuillus des moyennes latitudes, où les conditions lui étaient très favorables du fait du climat et des sols :

- humidité et températures adaptées à la production céréalière, base de l'alimentation dans ces régions ;
- sols développés sur des matériaux périglaciaires à propriétés physiques et chimiques souvent avantageuses (loess par exemple).

Ainsi, sur ces sols à la fois jeunes et stables, le cycle biogéochimique, qui fonctionne d'emblée à partir des différents compartiments constitutifs, à savoir vivants, organiques et minéraux (d'origine ou de néoformation), repose sur l'existence de 3 caractéristiques :

- une *réserve minérale*, qui libère en permanence des éléments nutritifs, tels K, Ca, Mg, P... par altération des roches ;
- des particules *argileuses chargées* (type 2/1), qui, ayant une capacité d'échange élevée, retiennent les cations minéraux libérés et régulent ainsi leur disponibilité pour les végétaux ;
- des constituants *humiques* qui, tout en étant à la base de la cohésion du sol, participent à la régulation de la biodisponibilité des nutriments et assurent notamment l'alimentation en azote des plantes.

De telles caractéristiques permettent ainsi de comprendre comment l'artificialisation agricole de ces régions forestières à relief modéré s'est, tant qu'elle est allée de pair avec une productivité limitée, insérée parfaitement dans le cycle biogéochimique naturel.

Au demeurant, cela ne veut pas dire qu'il ne faille pas être attentif. En effet, il s'agit en toutes circonstances d'un milieu ouvert qui, avec le temps, perd continuellement des éléments chimiques :

- d'abord du fait des conditions *naturelles*, suite au lessivage profond qui se produit année après année : décarbonatation, décalcification, désalcalinisation et acidification pouvant aller jusqu'à une aluminisation des sols ;
- ensuite en milieu *cultivé*, en raison des exportations annuelles par les récoltes, ce qui a contribué, par exemple, à l'épuisement des sols en phosphore au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle et aussi du fait de la lente disparition des matières humiques en relation avec la multiplication des façons culturales.

D'où la nécessité d'un apport régulier d'amendements (fumier, calcaire...) et d'engrais, qui contribuent au maintien du fonctionnement biogéochimique des sols après leur mise en culture. Ce n'est qu'à partir du moment où l'on a agi, en oubliant que le sol était avant tout un système biogéochimique –et non un simple matériau support- que des évolutions négatives dues au dérèglement des cycles ont commencé à se manifester, tant au niveau des sols eux-mêmes (dégradation, érosion, toxicité), que de celui de l'environnement (pollutions des eaux – eutrophisation).

Il est bon toutefois de rappeler ici qu'en raison de leur nature et de la stabilité qui les caractérisent, les sols des régions tempérées moyennes ont résisté *longtemps* à l'anthropisation du milieu.





Il n'en est pas de même lorsqu'on s'intéresse aux zones tropicales humides de la planète.

## Zones tropicales humides

Ces zones, qui présentent encore de vastes étendues sauvages (forêts et savanes), sont intéressantes du point de vue qui nous préoccupe, car ayant d'après leur climat et leur végétation naturelle des potentialités agricoles manifestes, les hommes souhaitent à l'heure actuelle les mettre en valeur après déforestation ; et ce, en appliquant souvent les méthodes mises au point dans les régions tempérées européennes. Or, avant d'entrer plus avant dans ce problème, il est bon de dire très clairement que ceci ne constitue pas la solution, du fait des grandes différences qui se manifestent entre ces deux grandes zones. Dans les régions tropicales humides, on a affaire tout d'abord à des sols certes profonds (ordre décamétrique), mais vieux puisqu'ils se développent et évoluent depuis des centaines de milliers d'années, en sorte qu'ils n'ont plus de réserve minérale et qu'ils sont particulièrement appauvris. S'ajoutent à cela des conditions climatiques très agressives, entraînant :

- une décomposition rapide des litières et résidus végétaux, qui ne donne donc pas lieu à la formation de constituants humiques dans les horizons superficiels des sols ;

- une altération intense des minéraux primaires aboutissant à la genèse d'argiles de type 1/1 (kaolinites), électriquement neutres qui, en plus de ne pouvoir retenir les cations (*low activity clays*), sont peu aptes à susciter des liens entre les particules du sol, liens pourtant nécessaires si l'on veut maintenir une certaine stabilité de matériaux qui sont par nature meubles.

Au total, les sols des régions tropicales humides ne sont pas de nature organominérale comme dans les régions tempérées, mais essentiellement à constitution minérale (en dehors naturellement des sols humifères d'altitude). En outre, ils sont généralement de type acide, fortement appauvris au plan chimique (non seulement en éléments majeurs, mais aussi en éléments mineurs, tels Co, Ni, Zn...) et enfin très fragiles mécaniquement (surtout quand ils sont mis à nu).

Pourquoi, dans ces conditions, supportent-ils une végétation forestière souvent luxuriante ? Cela résulte tout simplement du fait qu'en raison des conditions bioclimatiques un cycle biogéochimique très actif se met en place, dans les horizons de surface. Ce cycle est basé sur le passage *direct* des éléments nutritifs libérés à partir des résidus des êtres vivants jusqu'au système végétal lui-même, avec une complémentarité éventuelle en éléments minéraux assurée par les apports des pluviessivats atmosphériques (Ca, K...), ainsi que par les remontées en provenance des horizons profonds susceptibles d'être prospectés par le système racinaire très développé de la forêt .

Encore faut-il à ce stade ajouter deux points :

- le système biogéochimique se met en place lentement et ne se suffit à lui-même, qu'à partir du moment où des espèces arborées

longévives sont à même de développer des racines profondes. Or, il faut tabler sur 25 ans au moins, dans ces régions, pour que s'installe une nouvelle colonisation forestière ;

- ce système fonctionne aisément, parce qu'on est aussi en présence d'espèces végétales ligneuses, qui ne sont pas très exigeantes au plan de la nutrition minérale, comparée aux variétés utilisées habituellement dans l'agriculture vivrière.

Mais que devient un tel système lorsque l'on défriche pour mettre en valeur ?

Il est clair que, dans tous les cas et du fait du rôle fondamental joué par la biogéochimie du système, on rompt le système naturel, et qu'en conséquence on rentre dans le système de l'artificialisation pure et simple. Et c'est la raison pour laquelle, dans ces régions, la mise en valeur agricole devient d'entrée de jeu délicate et que l'application des pratiques modernes de l'agriculture occidentale, est en tout état de cause périlleuse,

- aussi bien dans le domaine chimique : fuite des engrais et dissolution rapide des amendements ;

- que dans le domaine mécanique : dégradation, voire érosion intense des sols mis à découvert suite à des défrichements destructeurs, puis à des travaux aratoires fréquents du fait d'un développement accéléré des mauvaises herbes.

Au temps de l'agriculture itinérante ou primitive, le système a pu continuer à fonctionner dans le long terme (jachère longue) ; ceci pour plusieurs raisons :

- d'une part, les défrichements se faisaient manuellement et de manière très sommaire ; ils étaient donc assez peu perturbants pour le milieu naturel et les sols ;

- d'autre part, les champs cultivés étaient vite abandonnés, et n'étaient remis en culture que lorsque le système biogéochimique se trouvait rétabli, c'est-à-dire plusieurs dizaines d'années après, à la suite de l'installation d'une forêt secondaire.

Ceci explique que, pour réussir une agriculture en continu dans ces régions, il faille avant tout tenter de maintenir la régulation biogéochimique et l'intégrité des sols, grâce à la mise au point de méthodes bien différentes de celles en usage dans les zones tempérées. Ces méthodes doivent être basées, en particulier, sur la protection de la surface du sol ; d'où l'intérêt du non-labour, du semis direct et des techniques culturales simplifiées (TCS) ; d'où l'importance de la récupération des résidus de récolte et du *mulching* ; d'où aussi la nécessité d'assurer une protection des sols pendant les périodes d'interculture en installant des plantes de couverture ; d'où enfin le recours à des cultures associées.

En quelque sorte, la particularité du fonctionnement biogéochimique dans ces régions tropicales humides conduit à concevoir l'agriculture d'une autre façon et à préconiser ainsi une agriculture qui soit « biogéochimiquement contrôlée », même si cette dernière est loin d'être au point ; et c'est ce qui constitue un grand défi pour l'avenir, car si le problème est difficile, ce n'est surtout pas à notre époque qu'il faut baisser les bras !



## Zones arides et semi-arides ( à l'exclusion des déserts)

Entièrement différentes des 2 domaines précédents, initialement forestiers, ces zones se déploient dans toutes les régions chaudes à climat très contrasté et où le déficit en eau, qui est marqué ( $P \ll E$ ), se traduit par l'existence d'une saison sèche accentuée ; d'où le développement :

- d'une végétation de type herbacé (steppe), souvent discontinue ;

- de sols peu profonds (ordre décimétrique) et qui sont le siège d'un cycle biogéochimique à la fois paresseux et de toute façon interrompu chaque année durant la saison sèche.

D'une manière générale, de telles régions sont caractérisées, soit par une activité pastorale pour les zones arides, soit par une agriculture pluviale –d'ailleurs souvent aléatoire– dans les zones semi-arides. Géographiquement, elles se situent de part et d'autre des tropiques ; ce qui conduit à devoir discerner 2 sous-ensembles possédant des paramètres climatiques et des histoires géologiques tout à fait différents.

Dans le cas de l'hémisphère nord (Tropique du Cancer) et de l'Afrique en particulier, on constate que :

- au sud du Sahara, s'étend le domaine sahélien caractérisé par un climat tropical sec (avec une saison humide en été) et par des sols généralement vieux, à dynamique latérale marquée et développés dans des paysages tropicaux essentiellement minéraux et souvent cuirassés ou fortement compactés (*hardsetting*) ;

- au nord du Sahara en revanche (Maghreb), on est dans un domaine à faciès méditerranéen (saison humide en hiver), avec des sols relativement jeunes.

Par rapport à ceux des zones humides du globe, qu'elles soient tempérées ou bien équatoriales, ces sols steppiques ont des caractéristiques bien spécifiques :

- tout d'abord, ils sont pauvres en matière organique et en azote, en raison du faible apport en résidus végétaux et d'une minéralisation très rapide ;

- en second lieu, ils ont tendance à être bien pourvus en éléments minéraux, et essentiellement pour deux raisons :

- \* l'existence d'une réserve minérale significative, conséquence d'une faible altération chimique ;

- \* la présence de minéraux argileux de type 2/1 (smectites), à capacité d'échange élevée (*high activity clays*), qui retiennent les cations au fur et à mesure de leur libération à l'échelle du profil.

Géochimiquement, il n'y a donc pas de perte en éléments, sauf lors d'épisodes climatiques extrêmes où peut se manifester une redistribution latérale le long de toposéquences ou encore à l'échelle de l'ensemble de l'écosystème.

Ici, les sols sont neutres et même légèrement basiques, avec de fréquents dépôts de  $\text{CaCO}_3$ .

Au total, du fait des contraintes hydriques, on a affaire dans ces régions à des sols biogéochimiquement peu actifs, mal adaptés à

une mise en valeur agricole correspondant aux normes habituelles, à moins de remédier à la sécheresse, ce qui peut être obtenu de 2 manières :

- en cultures pluviales, en maximisant le stockage des eaux « vertes » par des façons culturales appropriées, ou encore en utilisant des techniques limitant le ruissellement ;

- en cultures irriguées, en apportant de l'eau « bleue », provenant non de l'atmosphère, mais des nappes, des collecteurs ou des barrages. En général cela se passe bien, à condition de se prémunir des phénomènes de salinisation qui, pour des raisons climatiques et géochimiques évidentes, sont inéluctables dans le long terme si les terres soumises à l'irrigation ne sont pas simultanément drainées pour prévenir l'accumulation des sels.

Notons simplement ici que cette seconde solution semble avoir beaucoup moins d'avenir que la première, sur laquelle les recherches devront dorénavant porter en priorité.

## CONCLUSIONS

A la fin de cette présentation, qui n'a été en vérité qu'un survol, il me semble que l'on peut s'en tenir à deux conclusions : l'une se rapportant directement au sujet abordé, l'autre ayant un caractère plus général.

1) Le fonctionnement de la biosphère continentale repose sur la mise en œuvre d'un système cyclique de nature biogéochimique, dont le sol est le pivot. Si dès le départ des travaux scientifiques dans ce domaine on avait opté pour cette vision naturaliste fonctionnelle, qui était celle de W. Vernadsky et qui est celle de l'écologie scientifique, on aurait très certainement pu devancer l'émergence de la plupart des problèmes environnementaux de notre époque et, dans le même temps, mieux pu assurer la préservation de nombreux sols qui s'avèrent être à l'heure actuelle indispensables à la survie de l'humanité.

La science d'aujourd'hui doit donc non seulement expliciter des mécanismes à l'échelle moléculaire, mais aussi s'intéresser aux fonctionnements globaux des milieux naturels de la planète ; d'où un second enseignement.

2) Cette deuxième conclusion insiste sur l'impérieuse nécessité de promouvoir une recherche scientifique, qui soit en symbiose avec les différents problèmes que pose la nature et avec tout ce qui touche aux disciplines de l'histoire naturelle.

A notre époque, l'apport de la science, qui est incontesté, peut contribuer à un meilleur épanouissement de l'homme sur la planète. Encore faut-il que les rapports « science-nature » soient bien positionnés à la fois dans la recherche et dans la société. L'histoire de la mise en valeur agricole des sols nous permet de distinguer 3 grandes périodes, que l'on peut résumer comme suit.

- Dans la première qui a été fort longue depuis l'antiquité jusqu'au VII<sup>e</sup>-XVIII<sup>e</sup> siècle, la méthode scientifique était inconnue,





en sorte que l'approche des problèmes de la mise en valeur de la terre était très globale et découlait essentiellement du recoupement des nombreuses observations *empiriques* que les cultivateurs avaient engrangées au cours des temps. On peut désigner cette période sous le nom :

### **La nature sans la science**

- La 2<sup>e</sup> période (XIX<sup>e</sup>-XX<sup>e</sup> siècle) a été celle du grand développement des approches scientifiques notamment, dans le secteur des sciences exactes et expérimentales qui ont permis la compréhension de beaucoup de phénomènes<sup>3</sup>. A partir des résultats obtenus, on a été tenté implicitement d'appliquer aux choses de la terre les lois des seules sciences de la matière (chimie, physique...), donc de se contenter d'une approche sectorielle de type déterministe, excluant de ce fait les différents aspects biologiques. C'est ce qu'on peut appeler :

### **La science sans la nature**

Cette phase scientifique a donné lieu rapidement à des résultats performants en agronomie, mais elle a aussi à la longue montré ses limites, en étant à l'origine de perturbations environnementales.

- La 3<sup>e</sup> période est la période contemporaine (XXI<sup>e</sup> siècle) qui implique :

\* d'abord de replacer l'approche précédente de type réductionniste dans un cadre naturaliste ;

\* ensuite d'étudier l'épiderme de la Terre en tant que système complexe à caractère biologique, où se manifestent en permanence des interactions entre organismes vivants et monde inerte (minéral et organique).

Il s'agit là d'un retour à une approche globale des problèmes de la nature, mais à caractère scientifique comme celle initiée par la discipline écologique.

On peut appeler cette troisième période :

### **La nature avec la science**

ou

### **La science dans la nature**

C'est cette dernière voie qui est celle de l'avenir, même s'il reste encore beaucoup à faire pour mieux maîtriser l'évolution actuelle de notre Planète. Inciter à développer ce type d'approche est, en tout cas, le message principal sur lequel je souhaitais attirer votre attention. »

<sup>3</sup> : Dans les domaines de l'histoire naturelle et de tout ce qui concernait la biologie, on se contentait de faire l'inventaire et de proposer des classifications, ce qui déjà en soi était un énorme défi.





}  
}  
|  
}





## PUBLICATIONS ET DOCUMENTS PUBLIÉS PAR L'AFES

### Revues

#### Science du Sol

Revue scientifique publiée de 1952 à 1993.  
Elle comporte 300 à 400 pages par an. Un index est présenté tous les ans dans le quatrième numéro.  
A cessé de paraître fin 1993. Certains numéros disponibles.

#### La Lettre de L'Association

Publiée quatre fois par an, ce journal annonce les nouvelles de l'association, les réunions nationales et internationales ; il donne des critiques d'ouvrages, de thèses, de la documentation, etc.

La Lettre est envoyée à chaque adhérent de l'association : elle accompagne l'adhésion.

Rédacteur en chef : J.P. Rossignol, ENITH, Angers.

#### Etude et Gestion des Sols

Revue trimestrielle, francophone traitant de la connaissance et de l'usage des sols.

Rédacteur en chef : M. Jamagne.

Secrétariat de rédaction : Micheline Eimberck et J.P. Rossignol.

Le Comité éditorial est composé de trente membres de France et de pays francophones.

### Ouvrages

#### Le Livre Jubilaire (1984)

Point sur les acquis à cette date en matière de science du sol et de pédologie.

#### Fonctionnement hydrique et comportement du sol (1984)

#### Podzols et podzolisation

par D. Righi et A. Chauvel : ouvrage publié en coédition par l'AFES et l'INRA, avec le concours du CNRS, de l'ORSTOM, et de la région Poitou-Charentes (1987).

#### Micromorphologie des sols/Soil micromorphology

par N. Fédoroff, L.M. Bresson, Marie Agnès Courty, publié par l'AFES avec le concours du CNRS, de l'INAPG, de l'INRA, du Ministère de l'Environnement et de l'ORSTOM (1985) (épuisé).

#### Carte mondiale des sols et sa légende (1984)

Présentée sous forme numérique.

#### Le Référentiel Pédologique

Principaux sols d'Europe, deuxième édition 1995.

Ouvrage collectif publié par l'AFES et l'INRA.

#### Synthèse nationale des analyses de terre : Période 1990-1994

par C. Walter, C. Schwartz, B. Claudot, P.-Aurousseau et T. Bouedo, avec le concours du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

#### Actes du XVI<sup>e</sup> Congrès Mondial de Sciences du Sol, Montpellier - Août 1998

