

---

# Conférence introductive aux V<sup>èmes</sup> Journées Nationales de l'Étude des Sols

## Rennes, 23 avril 1996

---

# La science des sols à l'aube du XXI<sup>ème</sup> siècle

G. Pédro

Académie des Sciences - Institut de France - 23, Quai de Conti 75006 Paris  
Académie d'Agriculture de France - 18, rue de Bellechasse 75007 Paris

### RÉSUMÉ

La science des sols constitue une discipline scientifique qui n'était pas jusqu'alors arrivée à maturité, d'une part en raison de sa relative jeunesse, et d'autre part, du fait de l'extrême variabilité caractérisant son objet d'étude.

Il n'en n'est plus de même aujourd'hui, à la suite de l'immense travail qui a été accompli au cours des cinquante dernières années notamment. Désormais cette discipline dispose de la plupart des éléments lui permettant de répondre efficacement aux principales questions, relevant de l'alimentation et de l'environnement, qui interpellent sans aucun doute l'humanité dans un très proche avenir.

Au demeurant, pour remplir pleinement cette mission, la science des sols doit tout d'abord surmonter les deux écueils qui semblent la guetter à l'aube du XXI<sup>ème</sup> siècle :

- l'un a trait à la tendance vers une hyperspécialisation, qui la conduirait inévitablement à se détacher de ses racines ;
- l'autre résulte de la nécessité qu'elle a, tout en gardant son âme, de s'associer aux autres disciplines du milieu biophysique et de l'environnement ; ceci de manière à appréhender dans les meilleures conditions l'état et l'évolution de la surface de la Planète.

Mais, en second lieu, elle se doit aussi, en tant que biogéosciences, de mieux intégrer les trois éléments qui font sa réelle spécificité, à savoir l'espace, le temps (durée) et la vie.

C'est en prenant en compte réellement ces différents aspects que la science des sols sera à même, semble-t-il, de fournir la plupart des réponses que l'humanité attend d'elle dans un futur immédiat.

### Mots clés

Identité et multidisciplinarité, sol et espace, sol et durée, sol et vie (biogéosciences).

### SUMMARY

#### SOIL SCIENCE AT THE DAWN OF THE XXI<sup>ST</sup> CENTURY

Soil science constitutes a scientific discipline which, until recently, did not yet come to maturity, due, on the one hand, to its relative youngness, and on the other hand to the extreme variability of the studied object.

That is no more the case today, following all the work that has been achieved during the last fifty years in particular. From now on, this discipline has the main keys to answer efficiently most questions dealing with food supply and environmental issues, which will, without doubt, call out humanity in the very near future.

Nevertheless, to fully fulfil that mission, soil science has first to overcome two obstacles which seem to appear at the dawn of the XXI<sup>st</sup> century :

- one is dealing with a hyperspecialization tendency, which will lead it inevitably to grow away from its roots ;
- the other results of the necessity that it has, but keeping its soul, to join together with other disciplines of the biophysical medium and the environment ; this in order to reach the knowledge, in the best conditions, of the state and the evolution of the Planet surface.

But, in a second time, it has also, as a biogeoscience, to better integrate the three elements which are making its real specificity, that means space, time and life.

It is by taking into account those different aspects that soil science will be able to give the answers that humanity is awaiting from it in the near future.

Key-words

Identity and multidisciplinaryity - soil and space - soil and time - soil and life (biogeoscience)

**J**e souhaiterais commencer par indiquer tout le plaisir que j'ai, au soir de ma carrière, à avoir à vous parler de la discipline à laquelle j'ai consacré l'ensemble de ma vie professionnelle et à remercier le Comité d'organisation des V<sup>èmes</sup> Journées Nationales de l'Étude des Sols, C. CHEVERRY et C. WALTER tout spécialement, de m'en avoir donné l'occasion.

J'aimerais par ailleurs ajouter que ce plaisir est grandement amplifié par le fait que cette réunion se tient en Bretagne ; ceci au moins pour trois raisons :

- En premier lieu, par les liens très forts qui ont toujours existé en Armorique entre les forces de la nature, la terre et les hommes. On le voit très nettement par exemple à travers toute la littérature bretonne : depuis les "Romans de la Table Ronde" (le cycle arthurien n'exprime-t-il pas le besoin inconscient des hommes de s'intégrer à l'environnement tout en l'interprétant) jusqu'à celle d'aujourd'hui (je pense par exemple au livre de Pierre Jakez Helias : "Le cheval d'orgueil"), en passant naturellement par Châteaubriant, qui a écrit des phrases magistrales dans les "Mémoires d'Outre-Tombe".

- Ensuite parce que Rennes a joué un rôle de pionnier au XVIII<sup>ème</sup> siècle dans la promotion de l'agriculture en France. Cette ville a été en effet la première, en 1757 lors d'une réunion du Parlement de Bretagne, à avoir créé une Société d'Agriculture, qui a été par la suite à l'origine des autres sociétés régionales d'Agriculture (Tours, Orléans, Alençon...) ancêtres de la Société Royale d'Agriculture, qui a vu le jour en 1788 et perdure aujourd'hui sous le nom d'Académie d'Agriculture de France.

- Enfin, parce que tous les grands problèmes de notre époque en relation avec la terre et les hommes et qui découlent de la confrontation agriculture - environnement, se trouvent réunis dans cette contrée, qui est, et ceci est bien connu, la première région agricole du pays.

## OÙ EN EST-ON AUJOURD'HUI EN SCIENCE DES SOLS ?

Où en est-on réellement alors que le XXI<sup>ème</sup> siècle va poindre dans quelques années ?

Il faut bien dire d'entrée de jeu et d'ailleurs contre toute logique, que la situation de la Science des Sols, discipline qui constitue pourtant un des pivots de la Biosphère continentale, est loin d'être de nos jours, aussi bonne qu'elle le devrait ; c'est vrai en France, c'est vrai aussi dans les autres pays (nous ne sommes donc pas une exception !). Tout se passe comme si on lui reprochait de ne pas avoir donné ce qu'on attendait d'elle, aussi bien au plan de la science que dans le domaine des applications. A ce sujet, je prendrai brièvement un exemple pour chacun des deux champs considérés.

Dans le domaine de la science fondamentale, à l'époque où l'on se passionne pour les changements globaux et les grands programmes Géosphère-Biosphère, il est reproché à la Science des Sols de ne pas s'être investie assez tôt dans la participation quantitative des sols au cycle du carbone à la surface de la planète.

Si l'on aborde maintenant le domaine appliqué, il est certain que les planificateurs, aménageurs... n'ont pas trouvé pendant longtemps, dans les cartes pédologiques qu'ils souhaitaient et qu'on leur fournissait, une aide suffisante dans les divers problèmes qu'ils avaient à résoudre, soit lors de la mise en valeur de territoires peu connus, soit encore lors des opérations d'aménagement à entreprendre dans des contrées de plus vieille tradition.

On peut le regretter, mais on ne devrait pas toutefois en être tellement étonné, et ce à plusieurs titres :

ζ Le premier est que notre discipline constitue une science encore jeune, qui avait besoin de s'étoffer avant de pouvoir

donner sa pleine mesure dans tous les domaines où elle se trouve en première ligne. L'erreur a peut-être été de laisser croire au départ qu'elle était à même d'apporter plus qu'elle ne le pouvait. C'est là, d'ailleurs et toujours, un péché de jeunesse, lié d'une part à la foi et à l'enthousiasme des pionniers et d'autre part à l'attrait indubitable qu'exercent sur les individus les nouveaux champs de la connaissance.

ζ La deuxième raison est que son développement ne s'est pas fait de manière cohérente, puisque le sol a été utilisé spontanément par l'homme avant d'être conçu comme un objet scientifique. Généralement dans les disciplines du milieu naturel, on a commencé par identifier les objets de la nature et par en faire l'inventaire, avant d'étudier de manière programmée leurs fonctions ainsi que les mécanismes dont ils sont le siège. Dans notre cas, en revanche, comme l'objet d'étude est plus difficile à circonscrire et que sa prise en compte implique, qu'on le veuille ou non, un effort intellectuel qui n'est du tout spontané, les recherches ont été menées de façon plus décousue et ont ainsi porté d'abord sur la connaissance des usages et des fonctions des sols (et ce, principalement en relation avec le développement de plantes et la production de biomasse), avant d'aborder les questions fondamentales portant sur la structure et la genèse :

- nutrition en éléments minéraux ; l'apport des chimistes a été au départ considérable (J. Liebig, J.B. Boussingault) relayé ensuite par les minéralogistes et les cristallographes ;
- nutrition azotée liée à la composante organique et en relation avec les activités microbiologiques (J. J. Schloësing, M. Berthelot, S. Winogradsky) ;
- alimentation hydrique en relation avec les interactions de type physique entre solide, liquide et gaz ;
- intervention de la faune géophage ; apports de zoologistes célèbres : Ch. Darwin (vers de terre) surtout, mais aussi P. P. Grassé (termites) ;

De la sorte, tout était préparé pour faire du sol un objet d'étude :

- des chimistes et minéralogistes,
- des physiciens et hydrodynamiciens,
- des biologistes et microbiologistes.

ζ Quant au troisième aspect, il résulte du fait que le sol constitue un objet d'étude bien particulier. L'idée de considérer le sol comme un objet naturel<sup>(1)(\*)</sup>, constituant le 4<sup>ème</sup> règne de la nature à côté des minéraux, des végétaux et des animaux, revient à B. B. Dokouchaev, qui vers 1883, a créé ainsi la Pédologie (étymologiquement Science des Sols) ; et ceci a représenté une étape intellectuelle capitale. Il n'en reste pas

moins que l'analyse de Dokouchaev, pour innovante qu'elle ait été, était encore bien imparfaite, l'assimilation des sols aux êtres vivants s'étant révélée quelque peu erronée :

λ Si le sol est bien un corps naturel, il est avant tout un objet à contour non délimité ; il ne constitue pas en fait une entité comme un végétal ou un animal. Sa dimension spatiale est donc partie intégrante de sa définition.

λ Par ailleurs un sol n'ayant pas de programme intérieur, sa genèse et son évolution ne sont pas décidées une fois pour toutes, mais s'ajustent continuellement aux conditions du milieu. Il n'en n'est pas de même pour les êtres vivants, animaux mais aussi végétaux, même si la croissance et le développement de ces derniers sont susceptibles de se modifier en fonction de l'environnement externe.

Ces différents éléments permettent donc de bien comprendre que jusqu'à il y a une vingtaine d'années, la science des sols ressemblait d'une certaine manière à la physique et à la mécanique avant Gaillée, à savoir une discipline de type "protoscience" qui avait accumulé des trésors de faits plus ou moins disparates ainsi qu'un certain nombre d'explications partielles, sans être encore parvenue à un savoir scientifique suffisamment élaboré. Et on sait que dans ce cas, les chercheurs essaient toujours de combler les lacunes de leur connaissance factuelle par un appareil théorique, qui reste souvent encore hypothétique et de ce fait insuffisant si l'on veut répondre, tant soit peu sérieusement, aux exigences de la réalité.

Il n'en est plus de même aujourd'hui, en raison des progrès fulgurants réalisés depuis 50 ans, dans la connaissance des objets, des phénomènes et des concepts pédologiques. Aussi la science des sols peut-elle être considérée, à l'aube du XXI<sup>ème</sup> siècle, comme une discipline incontournable par suite de son implication directe dans des domaines aussi importants, pour l'avenir de l'humanité, que sont ceux de l'alimentation et de l'environnement. Au demeurant, pour remplir pleinement cette mission, la science des sols doit à l'avenir se garder de deux écueils qui la guettent inexorablement.

## LES DEUX ÉCUEILS À ÉVITER DANS L'AVENIR POUR LA SCIENCE DES SOLS

Ces deux écueils peuvent être présentés de la manière suivante :

- Le premier consisterait en une tendance vers une hyper-spécialisation sans retour ; il correspondrait à un découpage en tranches de la discipline.

- Le second, qui s'est manifesté plus récemment, se traduirait par une incorporation plus ou moins implicite au sein d'un ensemble plus vaste, qui engloberait la biosphère continentale

(\*) Les notes sont rassemblées à la fin du texte.

toute entière.

## Tendance vers une hyperspécialisation sans retour

Cette tendance résulte avant tout de la nature même de l'objet sol.

Le sol est en effet un corps divisé et poreux, donc formé à la fois par des constituants solides minéraux et organiques peu mobiles, et par des pores, qui sont occupés par diverses phases mobiles :

- gaz en relation avec l'air atmosphérique ;
- eau liquide en rapport avec l'atmosphère et l'hydrosphère ;
- organismes vivants qui forment la biosphère tellurique.

Il découle de cela que eau, air et organismes vivants sont bien, à côté des phases solides, des constituants à part entière du sol. C'est la présence généralisée des êtres vivants, qui fait de la Science des Sols une véritable biogéoscience et même, pourrait-on dire, la seule biogéoscience des disciplines de la nature, puisque la seconde, la Paléontologie, s'intéresse, elle, à des organismes fossilisés.

Quant à la disposition des constituants les uns par rapport aux autres au sein de l'objet, celle-ci n'est pas quelconque, en sorte que le sol est effectivement un corps organisé à la fois au plan microscopique et macroscopique. Mais il ne l'est pas comme un plante ou un animal, qui possède une organisation d'ordre stricte. Dans le cas du sol, l'organisation est plus lâche : microscopiquement, elle relève plus de l'ordre associé au "chaos" (représenté par exemple par les quasicristaux à symétrie d'ordre 5) ou encore à la "matière molle", que de l'ordre cristallin véritable ; au plan macroscopique, l'organisation n'est jamais absolument stricte même si la plupart du temps le sol possède une certaine polarité verticale.

Tout ceci amène à conclure très logiquement que la Science des Sols est avant tout une science d'observation (comme les autres disciplines de la nature) et que, de ce fait, l'observation des objets (2), soit l'anatomie ou encore la morphologie, reste à la base de toutes les autres investigations. Mais pratiquer l'observation ne veut pas dire s'en tenir à l'observation visuelle de nos anciens ; l'observation peut, et doit se faire aussi à différents niveaux, aussi bien à l'échelle microscopique (depuis le microscope classique jusqu'aux microscopes électroniques à très haute résolution) qu'à l'échelle mégascopique, grâce à l'emploi par exemple des satellites et de la télédétection.

Cela étant, dès que l'on veut étudier les phénomènes et décrypter les mécanismes qui sont à l'origine de la formation, de l'évolution et du fonctionnement des sols, on est conduit suivant la méthode en vigueur depuis Descartes à bien dissocier les différents aspects des choses, afin de les étudier de manière séparée ; d'où le recours en laboratoire aux diverses sciences de base : hydrodynamique, physico-chimie et biochi-

mie, cristallographie, microbiologie... ; ce qui implique obligatoirement une certaine spécialisation.

ζ Au départ et pendant une certaine d'années environ cette manière d'opérer s'est avérée indispensable pour pouvoir avancer dans la connaissance intime des objets. Mais l'expérience montre qu'elle tend inéluctablement à spécialiser les chercheurs et à les éloigner de leur objet d'étude. En effet, on part bien de la réalité (3), mais on rentre très vite dans le domaine du formalisme, de la mathématisation (avec nombreuses relations, équations, réactions...), et partant, comme le dit F. Gros (4) à propos des sciences biologiques qui ont le même problème, dans le domaine de l'abstraction. Très rapidement, on arrive ainsi à être coupé de ses racines et à se trouver en quelque sorte dans le vide, à moins qu'on s'impose à chaque fois de faire le chemin inverse, qui permet de rattacher processus et mécanismes étudiés à l'objet d'investigation.

ζ A l'époque actuelle, et au stade où en est arrivée notre science, en particulier avec tous les moyens techniques dont on dispose aujourd'hui, il est manifeste que le réductionnisme pur et dur ne s'avère pas être la seule méthode scientifique à préconiser. On a constaté en effet que, dans le fonctionnement d'un objet aussi complexe que le sol, tout était lié ; l'association des caractéristiques minéralogiques et des données biochimiques impliquant l'apparition de propriétés physiques, de réactivités physico-chimiques et de contraintes biologiques bien déterminées. Il ne me semble donc plus possible de continuer à étudier les choses séparément, comme on l'a fait durant trop longtemps et comme cela est encore prôné dans le cadre de l'Association Internationale de Science du Sol (AISS), avec l'existence de diverses commissions et sous-commissions axées principalement sur les sciences de base.

La leçon essentielle, qui résulte de cet ensemble de remarques, peut se résumer de la façon suivante :

1) Utiliser les sciences de base naturellement, mais en les considérant comme des disciplines auxiliaires, c'est à dire en les incorporant toujours et à tous les niveaux, à notre objet d'étude : le sol.

2) Associer dans tous les problèmes à examiner l'approche de plusieurs sciences de base, la réactivité des sols étant toujours une caractéristique mixte.

3) Structurer la discipline, dans le cadre de l'AISS notamment, en se référant aux seuls aspects thématiques : genèse, cartographie, agro-pédologie, ressources en sols..., au détriment du découpage à partir des sciences de base.

En somme "réapprendre à être des naturalistes" (F. Gros), car comme l'a écrit récemment R. Dautray (5) "Les sciences ne sont-elles pas, toutes et toujours, des sciences naturelles ?".

## Tendance à la globalisation multidisciplinaire

La nécessité d'avoir une vision intégrée de la surface de la

planète semble à notre époque tout à fait indispensable, d'une part pour mieux comprendre le fonctionnement naturel de la biosphère continentale et, d'autre part, pour être mieux à même ensuite de l'aménager. L'écosystème terrestre a plusieurs composants : air, eau, sols, micro-organismes, végétaux, animaux qui inter-réagissent les uns sur les autres comme dans un système, et qu'il faut donc prendre en compte simultanément si l'on veut en déceler l'évolution, puis gérer cette dernière. Les études basées sur les relations linéaires de cause à effet comme dans les sciences de base, ne sont pas à ce niveau d'un grand secours. La seule manière d'aborder efficacement les problèmes consiste alors à tenter d'appréhender dans le même temps l'ensemble des paramètres mis en jeu à l'aide des méthodes de la modélisation et à remplacer de ce fait les instruments traditionnels de laboratoire par des ordinateurs, et même bientôt par des "super-ordinateurs" qui permettront la visualisation des phénomènes étudiés ainsi que l'obtention d'images animées.

Cette démarche a actuellement un certain succès, surtout dans le domaine de l'environnement ; mais elle est encore loin d'être maîtrisée, ce qui entraîne soit un excès de discours (et de vocabulaire), soit un excès de mathématisation. Elle est à l'origine d'un certain nombre de grands programmes internationaux, qui serviront sans doute à la science de demain, mais qui en attendant servent aussi aux scientifiques les plus introduits pour récupérer les crédits et pour piloter les recherches dans la direction de leur souhait.

Là encore, il faut être conscient de la nécessité de ces nouvelles approches, chaque science de la nature ne pouvant assurer à elle la connaissance du milieu biophysique ; en outre il est manifeste aujourd'hui que cette approche biophysique doit toujours être complétée par les acquis des sciences de l'homme et de la société, si l'on veut appréhender convenablement la gestion à plus long terme de la surface de la planète.

Cela étant, notre discipline, qui se trouve être au cœur de l'écosphère, n'a pas à se diluer progressivement et à perdre son âme ; cette manière de faire ne serait d'ailleurs bonne, ni pour elle-même, ni pour les autres.

### En définitive, un impératif majeur : garder son identité

A l'issue de cet ensemble de considérations, il semble capital pour notre discipline de garder sa pleine identité, tout en étant conscient :

- qu'elle doit nécessairement s'appuyer sur des sciences de base à travers des investigations de laboratoire de plus en plus sophistiquées ;

- mais qu'elle n'hésite pas en même temps à s'associer à d'autres disciplines du milieu et de la société, qui sont alors des compagnons de route. C'est la seule manière d'opérer, si l'on veut faire pleinement reconnaître le rôle qui est dû au sol

dans l'évolution et l'aménagement de la planète.

Or ce mode d'approche pluriel, qui exige un savoir de plus en plus encyclopédique, est une des raisons de la crise qui perturbe quelque peu la recherche scientifique à notre époque, et qui résulte tout simplement du long cheminement intellectuel réalisé par l'homme depuis que ce dernier a été amené à se poser des questions sur le monde qui l'entoure et dans lequel il vit.

Que faire alors devant une masse de connaissances qui dépasse naturellement les capacités intellectuelles d'un seul homme, aussi grand soit-il ? Je crois que la seule solution qui reste à un scientifique de notre temps, c'est d'être, comme le disait si bien Georges Millot : "orfèvre dans un domaine et cultivé dans le reste", les deux termes de la proposition ayant naturellement la même importance.

C'est cet enseignement que j'aurais tendance à retenir aujourd'hui.

## SPÉCIFICITÉ DE LA SCIENCE DES SOLS EN TANT QUE BIOGÉOSCIENCE

Depuis la dernière guerre, les connaissances ont très notablement progressé aussi bien dans le domaine de l'inventaire et de la caractérisation des principaux sols du monde que dans celui de leur fonctionnement en milieux naturels et anthropisés. Il ne s'agit pas de faire ici le point à ce sujet ; je me bornerai donc à mettre l'accent sur ce qui, à l'heure actuelle, semble constituer la réelle spécificité de notre discipline en tant que biogéoscience type, à savoir, le rôle majeur joué par trois éléments : l'espace, le temps chronologique (durée) et la vie, avec toutes les conséquences qui découlent de cet état de choses.

### Le sol est un objet spatialisé

Le sol ne constitue pas un objet de la nature à contour délimité. Il se développe en effet sur un certain espace (et c'est là l'origine de la notion de "couverture pédologique"), en sorte que sa définition actuelle doit inclure - nécessairement et de manière congénitale - l'aspect spatial.

Or une telle conception des choses nous éloigne quelque peu de la notion de type de sol chère à B. B. Dokouchaev et à ses élèves, et encore plus du pédon de la Soil Taxonomy. Elle nous éloigne en même temps des classifications ou taxonomies, qui constituaient l'alpha et l'oméga de la pédologie dans ma jeunesse, mais qui continuent encore aujourd'hui à obscurcir plus qu'à clarifier le monde pédologique (6). Non pas qu'il ne faille pas de classifications ou encore de nomenclatures des principaux objets-sols ; celles-ci sont naturellement nécessaires - comme le WRB par exemple (7) - si l'on veut

connaître, caractériser et comparer les différents objets pédologiques que nous livre la Planète (8) ; mais elles le sont dans un but scientifique (référentiel de base) et non à des fins cartographiques. L'assimilation unité typologique - unité cartographique, qui était à la base des raisonnements de la première phase de la pédologie, n'est plus acceptable à notre époque.

Aujourd'hui, la définition du sol doit partir du terrain, la connaissance de ce dernier impliquant nécessairement son insertion au sein de l'unité topographique fonctionnelle du milieu considéré, à savoir le bassin-versant. Ainsi, couvertures pédologiques et bassins-versants constituent-ils à l'heure actuelle des composantes indissociables.

### Le sol est un objet temporel

Le facteur temps (durée) faisait partie de la conception de B. B. Dokouchaev ; mais il intervenait de la même façon que pour les autres objets de la nature, et en particulier pour les êtres vivants, avec la considération des étapes successives : naissance - jeunesse - maturité - vieillesse - mort. En réalité, le problème ne se présente pas tout à fait de cette manière. Naturellement le sol prend naissance un jour, puis se développe ; mais à moins d'être déblayé à la suite d'érosions catastrophiques et de servir ainsi de matière première aux dépôts sédimentaires, un sol en contact avec la bioatmosphère ne meurt jamais (9). Il évolue in situ tout au long de son histoire. Si cette histoire est brève (ordre de la centaine ou du millier d'années), son individualisation exprime grosso modo l'action des conditions moyennes qui l'entourent aujourd'hui, et il existe alors une relation d'ordre strict entre type de sol et conditions externes. En revanche, si l'histoire s'étale sur une plus longue période (centaine de milliers d'années et même quelquefois millions d'années), les conditions d'évolution ont été amenées à changer, que celles-ci soient d'ordre climatique, biosphérique, tectonique, eustatique... Les choses sont alors moins simples, le sol en place ayant intégré l'ensemble des processus dont il a été le siège. Son anatomie, qui est généralement complexe, n'est alors représentative que des zones de la surface du globe ayant subi une histoire similaire au cours de périodes qui ont pu être plus ou moins longues.

Ces constatations nous conduisent ainsi aujourd'hui à devoir distinguer en Science des Sols trois niveaux de perception en fonction de la durée des phénomènes, même si, avec les outils mathématiques les plus modernes, le couplage par modélisation des différentes échelles de temps s'avère être de nos jours très performant en vue de l'élucidation des histoires à retracer.

ζ Le premier niveau correspond à la Science des Sols de B. B. Dokouchaev (10), qui a été à l'origine de la discipline. C'est une pédologie de la moyenne durée (ordre du millier d'années ou de quelques millions d'années), au cours de laquelle le sol continue sensiblement à évoluer dans les mêmes conditions que celles qui ont présidé à sa naissance (évolution mono-

phasée). C'est la pédologie de l'orthotype.

ζ Cette façon de voir les choses ne suffit plus lorsque l'on passe au niveau des longues durées, comme cela se produit par exemple sur les vieux sols des régions tropicales, notamment dans ce qui a constitué le grand Continent de Gondwana. Les sols sont alors infiniment plus épais et peuvent présenter, dans le cadre d'un processus donné de l'altération géochimique, une anatomie qui peut être éminemment variable en fonction des vicissitudes qu'ils ont eu à subir ; d'où la difficulté de leur étude et la nécessité de réaliser des observations, à la fois nombreuses et très minutieuses, pour bien les appréhender.

L'étude de tels sols implique alors de se référer à la géochimie de surface, et c'est pourquoi je désignerai ce deuxième niveau de la Science des Sols, comme étant la pédologie de Georges Millot, sans pour autant oublier les beaux travaux effectués antérieurement dans cette optique par A. Lacroix, H. Harrassowitz et J. B. Harrison notamment.

ζ Enfin, pour tout ce qui concerne les sols cultivés, l'expression du sol dépend, en plus de tous les facteurs habituels, de la prise en compte de l'impact tant des variations climatiques saisonnières que des techniques culturales mises en œuvre. L'étude des sols se situe alors dans le court terme et correspond à un troisième niveau. La science en jeu repose avant tout sur le concept de "profil cultural" et correspond à ce que l'on pourrait appeler la pédologie de S. Hénin.

En conclusion, il apparaît clairement que la Science des Sols a le devoir de toujours bien se situer dans la durée (comme elle avait à se positionner dans l'espace), car les méthodes et les concepts à utiliser ne sont pas les mêmes suivant les échelles de temps considérées.

### Le sol : un milieu vivant et un véritable laboratoire biologique

Je m'en tiendrai simplement à rappeler quelques éléments dans ce domaine qui est pourtant plein d'avenir.

Ce rôle a été méconnu pendant longtemps. Il a fallu par exemple attendre la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle pour établir que l'alimentation azotée des végétaux résultait de la décomposition des compartiments organiques du sol par les microorganismes. Ainsi, sans microorganismes telluriques, pas de décomposition organique (11), pas d'azote minéralisé et, par voie de conséquence, pas de possibilité de vie hétérotrophe sur la terre.

C'est ensuite dans les années 1930-1950, qu'a été mise en évidence la production par les microorganismes du sol de substances antibiotiques. S. Waksman, qui était un chercheur en microbiologie des sols, grand ami par ailleurs de A. Demolon a montré en effet que les actinomycètes étaient susceptibles d'engendrer une substance antibiotique qu'il a appelé de ce fait la streptomycine. C'est cet antibiotique qui a permis de faire à peu près disparaître la tuberculose dès la fin de la dernière guerre ; d'où l'attribution du Prix Nobel de Médecine à ce

savant en 1952.

La présentation de ces deux problèmes illustre déjà suffisamment l'importance de la vie dans le sol, ainsi que le rôle capital joué par les microorganismes. Mais il y a encore beaucoup d'autres possibilités. Certaines font apparaître même une relation spécifique avec les types de sols (écosystème truffier, nécrose bactérienne de la vigne...). D'autres ont des implications encore beaucoup plus générales ; je ferai allusion brièvement à quatre d'entre elles :

ζ d'abord, il est bon d'insister sur le rôle fondamental de la rhizosphère ; l'intérêt des symbioses mycorhiziennes dans l'alimentation minérale des végétaux, ainsi que des symbioses actinorhiziennes dans la fixation de l'azote atmosphérique ;

ζ ensuite, il faut évoquer l'efficacité des microorganismes dans tous les problèmes de réhabilitation et de bioremédiation des sols contaminés par des produits organiques exogènes ;

ζ en troisième lieu, on ne peut oublier le rôle de certaines bactéries du sol dans la mise en œuvre de transgénèses végétales. M. Van Montagu (12) a bien montré par exemple que l'agrobacterium tumefaciens, qui est à l'origine de la galle du collet de la betterave, avait l'étonnante propriété de pouvoir transférer une partie de son information génétique (celle contenue dans les plasmides Ti) aux chromosomes des cellules des plantes - hôtes. Il s'agit donc bien d'un phénomène de transgénèse, mais de transgénèse naturelle, l'homme n'intervenant en rien dans le développement du processus. A partir de là, il devient tout à fait vraisemblable d'imaginer que le sol, grâce à l'intervention de certaines bactéries telluriques, ait pu jouer au cours du temps un rôle dans la transformation du génome d'êtres vivants et, par là même, dans le grand phénomène de l'évolution des espèces.

ζ Enfin, on peut signaler, en s'appuyant sur certains travaux de spécialistes de la faune des sols (13), que les premiers sols (en tant que matériaux poreux triphasés) ont pu à l'origine de la planète constituer un relais efficace, lors de la conquête des continents par les êtres vivants, en assurant le passage de la vie aquatique à la vie aérienne ; ce qui a impliqué le passage de la respiration cutanée à la respiration aérienne, de la fécondation externe à la fécondation interne...

Il n'est pas dans mon intention de m'étendre davantage sur ces problèmes. Je voulais juste attirer l'attention sur le fait que le sol, plus spécialement par l'intermédiaire de ses microorganismes, pouvait avoir un rôle de premier plan dans la vie et dans l'évolution de notre planète.

## EN ROUTE VERS L'AVENIR

Au terme de cette introduction générale aux Cinquièmes Journées Nationales de l'Étude des Sols, j'aimerais, en guise d'ultime message vis à vis de la Science des Sols, mettre l'accent essentiellement sur quatre points :

1) Je voudrais redire tout d'abord que la Science des Sols m'apparaît comme devant être, au cours du prochain siècle, une des disciplines clé, et même difficilement contournable. Il est clair en effet, suite aux imprudences commises par les hommes sur la Terre, durant les cinquante dernières années en particulier, que le sol constitue un véritable patrimoine et se présente plus que jamais comme le pivot du développement harmonieux de l'humanité et comme la base de ce que Linné a appelé au XVIII<sup>ème</sup> siècle "l'économie de la nature" ; étant avant tout le nœud de l'écosphère, il est effectivement le passage obligé de toute patrimonialisation de l'espace et de toute humanisation de la planète, que ce soit par l'intermédiaire de l'agriculture, de l'élevage, du pastoralisme, de la foresterie... Il est donc tout à fait logique que l'A. F. E. S. ait choisi comme thème pour le prochain Congrès Mondial de Science du Sol qui doit se tenir à Montpellier en 1998 et qui sera par ailleurs le dernier du XX<sup>ème</sup> siècle, le thème :

SOL √ HOMME

"Fonctionnement actuel des systèmes pédologiques mondiaux en relation avec les divers types d'utilisation des sols par les sociétés humaines"

De la même façon, on comprend très bien pourquoi le sigle retenu par l'INRA pour fêter l'anniversaire de sa création cette année soit aussi "Cinquante ans de Recherches pour la Terre et les Hommes" (14) ; ces recherches concernant comme cela est précisé, l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (avec tous les problèmes de pollution et de contamination qui existent depuis l'âge des métaux [3 300 av. J.C.], mais qui ont été amplifiés depuis la révolution industrielle).

La grande force de notre discipline, et je crois qu'on se doit d'insister là-dessus, c'est qu'en la pratiquant en tant que scientifique ou technicien, on se trouve d'office au carrefour de la science, de la culture et de la société, et que de ce fait on est d'emblée pleinement citoyen. Et cela me conduit directement au deuxième point.

2) Ce point s'adresse plus spécialement aux chercheurs en Science des Sols et porte sur le problème des publications.

La forme la plus efficace à notre époque se trouve être la publication de haut rang dans des revues spécialisées sur le sol, et rédigée la plupart du temps en anglais. C'est un moyen incontestable d'échange entre les chercheurs de la même discipline, moyen qui permet à la fois de suivre les progrès de la science et de servir de critère à l'évaluation des scientifiques.

Mais ce mode d'information à usage interne ne joue aucun rôle dans la promotion de la science auprès de la société (politiques, décideurs, financiers, sans parler du public de base qui crée l'opinion). Il serait donc souhaitable que tout chercheur soit conscient de cet aspect des choses et qu'il s'engage, de ce fait, à écrire aussi des articles à destination de l'extérieur, articles qui seront alors rédigés en français et présentés en outre sous une forme plus littéraire et plus appétante qu'une

pure note scientifique.

Ceci est vrai plus ou moins dans tous les domaines de la science, mais c'est encore plus vrai pour une discipline comme la nôtre qui, terre à terre, ni ne fait appel aux mystères profonds de l'Univers, ni ne procure d'émotions particulières (astres, galaxie, grandes épidémies,...). Il faut donc jouer sur les retombées, qui sont dans notre cas très importantes, puisqu'elles concernent aussi bien les problèmes d'alimentation que d'environnement.

3) Le troisième élément sur lequel j'aimerais m'arrêter maintenant est celui qui consiste à bien différencier les niveaux de perception et d'analyse de notre discipline ; niveaux, qui étaient plus ou moins implicitement confondus jusque là, probablement parce que la Science des Sols n'était pas arrivée au stade de science "mûre", comme le dirait P. G. de Gennes. Or une telle confusion nous a souvent mis en porte à faux.

A l'heure actuelle, il semble qu'on puisse aisément distinguer les trois niveaux suivants :

ζ Le premier niveau, qui est le niveau de base en quelque sorte, consiste à considérer le sol pour lui-même, donc comme un corps naturel spatialisé de l'épiderme de la terre, ayant un certain nombre de caractères spécifiques : il est le seul matériau de la planète à avoir une structure poreuse triphasée (solide - eau - air) et une constitution biominérale. Scientifiquement, il est alors l'objet d'une discipline bien déterminée (Science des Sols ou encore Pédologie), dont le propre est d'étudier les caractéristiques, les propriétés, les conditions de formation et les processus de genèse des différents sols de la Planète, et ce, indépendamment de leurs fonctions d'utilisation. Cette discipline d'amont doit donc non seulement être maintenue, mais pouvoir se développer convenablement ; car il est clair par exemple aujourd'hui que l'approche strictement dokouchaïevienne est loin d'être suffisante, notamment dans le cas des vieux sols de la zone intertropicale.

ζ Le deuxième niveau est celui qui consiste à appréhender le sol comme une composante essentielle de l'espace naturel des différents écosystèmes terrestres. Il s'appuie essentiellement sur le fait que la mise en place des paysages pédologiques doit faire intervenir la durée (depuis les quelques milliers d'années après la dernière glaciation pour les régions tempérées, jusqu'à des millions d'années - quelquefois depuis le secondaire - dans le cas des régions équatoriales restées émergées), donc prendre en compte l'évolution historique qui se doit d'intégrer alors les conditions paléoclimatiques, les variations eustatiques, les mouvements néotectoniques, les événements volcaniques...

A ce niveau, la compartimentation de l'espace paysagique est nécessairement une opération pluri-disciplinaire et implique la participation des diverses sciences du milieu biophysique ; la pédologie étant en interaction permanente avec la géomorphologie, l'orographie, l'hydrologie, l'écologie... La télédétection qui, d'une certaine manière, fournit directement des observa-

tions multi-disciplinaires, est alors d'un secours inestimable. La science des sols se trouve alors intégrée dans le grand ensemble des Sciences du milieu.

ζ Le troisième niveau a trait au sol considéré comme une ressource pour les milieux habités et anthropisés, ce qui implique de prendre en compte les activités humaines ; d'où l'introduction dans l'analyse à ce niveau, non seulement des sciences agronomiques et environnementales, mais aussi de bon nombre de sciences de l'homme et de la société (tradition des populations, structure foncière...). Le recours aux systèmes d'information géographique (SIG) devient à ce niveau particulièrement indiqué.

Ces trois niveaux ont tous leur place dans la recherche et doivent être l'objet d'investigations. Mais, s'ils sont effectivement coordonnés, ils exigent aussi de ne pas être confondus.

4) Enfin, la dernière réflexion que je désirerais livrer à cette assemblée, c'est de ne jamais oublier que la Science des Sols est avant tout une biogéoscience de la Nature, quels que soient les moyens intellectuels ou techniques qu'on est amené à utiliser au cours des recherches ; et qu'elle est en conséquence, au moins au départ, une science d'observation.

En envisageant les choses ainsi, on constate très rapidement tout l'intérêt d'une telle approche.

- En effet, cette approche se présente d'abord comme une école d'efficacité. Il est clair en effet que des recherches insuffisamment positionnées par rapport à l'objet d'étude ne sont jamais très performantes pour la discipline et souvent assez peu gratifiantes intellectuellement pour les individus.

- Ensuite, c'est une école de mesure et d'équilibre. Le forestier A. Parade avait pour devise "imiter la nature, hâter son œuvre". C'est vrai dans tous les domaines du milieu et de l'environnement ; c'est encore plus vrai pour le sol qui n'est pas du tout le support inerte des cultures, comme on l'a plus ou moins implicitement admis au cours de la période d'agriculture industrielle.

- Enfin, il s'agit d'une école de modestie, la référence constante à la nature, donc à la réalité, ne permettant ni de faire, ni de dire n'importe quoi. Par ailleurs, la nature nous apprend tous les jours tellement de choses que les plus grands chercheurs en science fondamentale en sont à notre époque éblouis. F. Gros, par exemple, a même conclu récemment son intervention lors d'un des colloques qui s'est tenu en septembre 1995 à l'occasion du Bicentenaire de l'Institut de France en disant : "Lorsqu'on regarde la nature, il est certain qu'on a besoin d'être un peu plus modeste" (15).

En m'appuyant sur l'ensemble de ces considérations, tout me pousse donc à conclure maintenant, qu'en ce qui concerne la Science des Sols, l'avenir paraît bien devoir être devant nous et, pour être plus précis, devant vous !



## NOTES DE LECTURE

- (1) En fait, il s'agit d'un "quasi-objet". G. Pédro, La Science des Sols en France. 1986, p. 257.
- (2) On le constate très bien aujourd'hui avec les demandes pressantes en gros moyens de la part de disciplines qui disposent d'observations insuffisantes pour avancer, et ce, du fait que les milieux concernés ne sont pas habités, et donc difficiles d'accès : atmosphère, océans, inlandsis...
- (3) Dans un certain nombre de cas, ce n'est même plus vrai aujourd'hui ; les jeunes chercheurs commençant directement à étudier des problèmes, sans avoir une connaissance suffisante des objets et sans positionner leurs recherches par rapport à une enveloppe générale.
- (4) Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences.
- (5) Membre de l'Académie des Sciences - Haut Commissaire à l'Énergie Atomique. Analyse du Tableau de J. B. Chardin : l'Allégorie des Sciences - Musée Jacquemart-André. in Les Collections de l'Institut de France - Imprimerie Nationale, 1995.
- (6) C'est ce qui explique ma réticence vis à vis de la tentative récente, et tout aussi "jargonisante" de mise sur pied en France du Référentiel Pédologique (R. P., 1992). Il est clair que cet exercice peut présenter un certain intérêt à une époque, où devant le grand nombre d'informations, on est amené à créer des banques de données et à informatiser. Mais, au plan scientifique, l'avenir de la discipline ne passe sûrement pas par là !
- (7) World Reference Base for Soil Resources - Draft 1994 - Rome - 161 p.
- (8) De ce point de vue, une définition précise des horizons pédologiques telle qu'elle a été réalisée par le R. P. constitue une excellente chose. Mais il suffisait d'en rester là.
- (9) Il n'est fait état ici que des évolutions naturelles. A côté de cela, il est clair que l'homme peut détruire ou effacer des sols, lors des opérations de génie civil par exemple (autoroutes, aéroports...).
- (10) Science introduite en France par V. Agafonoff (élève direct de B. B. Dokouchaev), puis par H. Erhart, A. Demolon et A. Oudin ; elle s'est développée surtout sous l'impulsion de G. Aubert et Ph. Duchaufour.
- (11) L. Pasteur a écrit : "Si les microbes disparaissaient du sol, la surface de la Terre serait encombrée de cadavres de tout genre, animaux et végétaux ; sans eux, la vie deviendrait impossible, parce que l'œuvre de mort serait incomplète."
- (12) Marc van Montagu est professeur de génétique moléculaire à l'Université de Gand (Belgique).
- (13) Cf. par exemple G. Vannier : Réactions des microarthropodes aux variations de l'état hydrique du sol. Éditions CNRS, 1970.
- (14) La France agricole. INRA mensuel n°86. Décembre 1995 ; le Président de l'INRA, Guy Paillotin, a écrit à propos des sols : "le sol cultivable par sa superficie et par l'étendue de ses potentialités, est l'un des éléments qui déterminent si une nation peut être ou ne pas être compétitive en agriculture. Naturellement il en est d'autres (les ressources en eau, la richesse économique, le savoir-faire des hommes...), mais celui-ci impose sa loi."
- (15) Actes des colloques du Bicentenaire de l'Institut de France (1795-1995). Fayard 1995, p. 166.