

Le sol, ressource naturelle à préserver pour la production et l'environnement

Michel Robert

A l'heure où un certain nombre de disciplines sont en mutation, aussi bien dans le domaine de la biologie avec le développement de la biologie moléculaire, que dans le domaine des sciences de la terre, on peut s'interroger sur

le devenir d'une science qui a plus de 100 ans, et sur l'importance à accorder au sol pour l'avenir. Les interrogations des chercheurs anglo-saxons sur « *the Soil Science in a changing world* » [1], ou même les expressions utilisées par la Commission Européenne sur le « gel

des sols » soulèvent effectivement un débat.

Nous envisagerons successivement le rôle du sol dans les régions sud et nord du globe. Une telle séparation est déjà justifiée pour des raisons socio-économiques et culturelles, mais également pour des raisons climatiques qui déterminent le plus souvent les types de sols et les types de contraintes pour l'agriculture. En conclusion, nous analyserons les raisons, différentes dans le passé, de plus en plus semblables pour le présent et l'avenir, qui conduisent aussi bien au sud qu'au nord, à rechercher une agriculture durable.

Le sol, un facteur essentiel de production pour les régions sud du globe

D'après la FAO, les sols cultivables sont estimés à 3 031 millions d'ha dont 877 pour les pays développés et 2 154 pour les pays en voie de développement. Ces derniers, si on se réfère à la *figure 1*, peuvent être très variés, mais certains grands groupes sont majoritaires sous les tropiques : les oxisols, ultisols et alfisols, qui correspondent approximativement aux sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux de la classification française, représen-

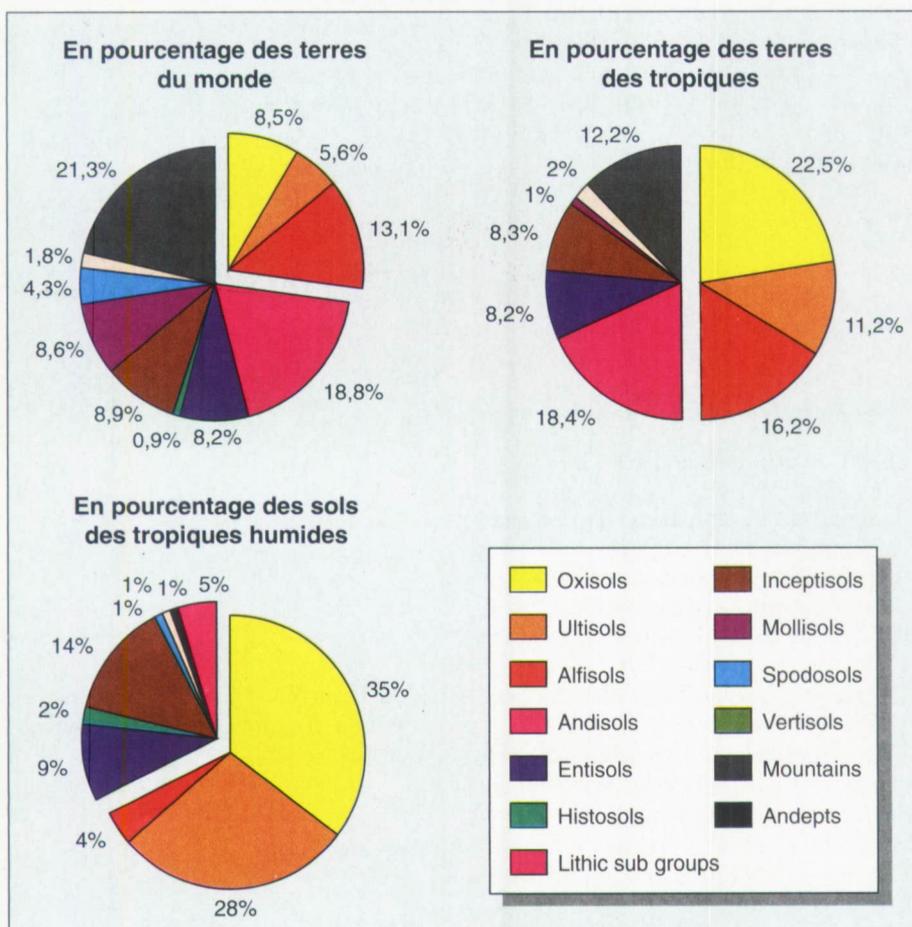


Figure 1. Surfaces couvertes par les différents types de sols tropicaux : dans le monde, sous les tropiques [1] et sous les tropiques humides [2].

Figure 1. Distribution of tropical soils : on a world scale, in the tropics worldwide [1], in the humid tropics [2].

M. Robert : Station de Science du Sol, INRA Versailles, route de Saint-Cyr, 78026 Versailles Cedex, France.

tent de loin la majorité [2, 3]. La proportion relative de ces différents types de sols peut être différente entre les continents : ainsi, les oxisols sont plus abondants sur les socles anciens (Amérique du Sud, Afrique), les ultisols sont en revanche, dominants en Asie. Dans les régions sud, le sol et la composante qui lui est liée, l'eau, ont toujours représenté une contrainte majeure pour l'agriculture. Nous allons citer les principaux problèmes qui se traduisent généralement par la dégradation des sols (figure 2). Nous distinguerons à ce niveau, les cas de dégradation physique de ceux qui apparaissent plus chimiques et nous ne ferons qu'effleurer la dégradation biologique qui, le plus souvent, est consécutive aux deux autres. Il faut noter que beaucoup de ces processus de dégradation peuvent conduire à la « désertification »

Dégradation physique des sols

• Déforestation et compaction des sols

Il est certain que la fertilité naturelle apparente des grandes forêts tropicales a toujours fait illusion. En réalité, il s'agit d'un écosystème fragile, et dès que l'on touche à ce système par les déforestations, on provoque des évolutions importantes et irréversibles qui intéressent plus de onze millions d'hectares chaque année dans les zones tropicales.

Beaucoup d'agronomes, en particulier anglo-saxons, considèrent que les pertes en matière organique et l'évolution de la fertilité chimique sont les principaux aspects de cette évolution. Ceci n'est évidemment pas à négliger, mais les travaux récents réalisés en particulier en Guyane (Ecerex) [4] ou en Amazonie montrent que l'évolution

des propriétés physiques est prépondérante. Sous forêt, il existe effectivement une couche humifère riche en carbone, azote et en cations métalliques recyclés par les racines et la microflore. Ces éléments lorsqu'ils migrent en profondeur sont réabsorbés par les végétaux et retombent au sol par les débris végétaux. Cet horizon de surface est également un horizon très agrégé (agrégats d'une taille de 200 μm à 1 mm) et donc perméable à l'eau et à l'air, et c'est la persistance ou au contraire, la destruction de ces agrégats et de la porosité existant entre les agrégats qui conditionne la réussite d'une déforestation et l'implantation d'autres cultures.

Ainsi, les expérimentations menées en

Guyane [5] montrent que sous forêt, la stabilité des sols est grande et l'érosion est faible (50 à 70 kg/ha^{-1}). Le défrichement mécanisé (Photo 1) augmente la production des transports solides de terre selon un facteur de 50 par rapport à la forêt (figure 3). Au niveau du charriage, cela correspond à des débits solides de 3 à 17 t/ha/an facteur 50 à 500 par rapport à la forêt). La prairie artificielle peut constituer un remède (augmentation limitée à un facteur de 2,4 à 32 fois par rapport à la forêt), mais l'effet dépend du type de plante installé et du mode de conduite du pâturage : des facteurs comme le degré de recouvrement du sol (sensibilité à la pluie), mais aussi la densité du bétail (effet de compac-



Photo 1. Défrichement mécanique et érosion en Guyane. (Cliché J-M Sarrailh).

Photo 1. Mechanical clearing and erosion in French Guyana.

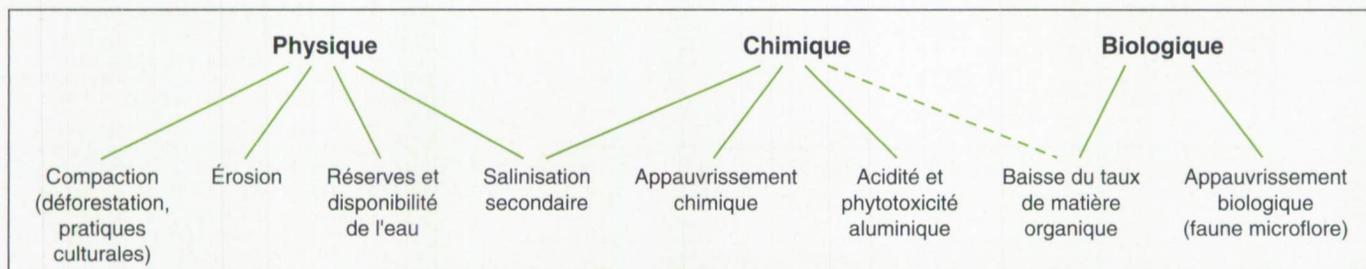


Figure 2. Principaux types de dégradation des sols (pour les régions sud du globe).

Figure 2. Main types of soil degradation (southern part of the world).

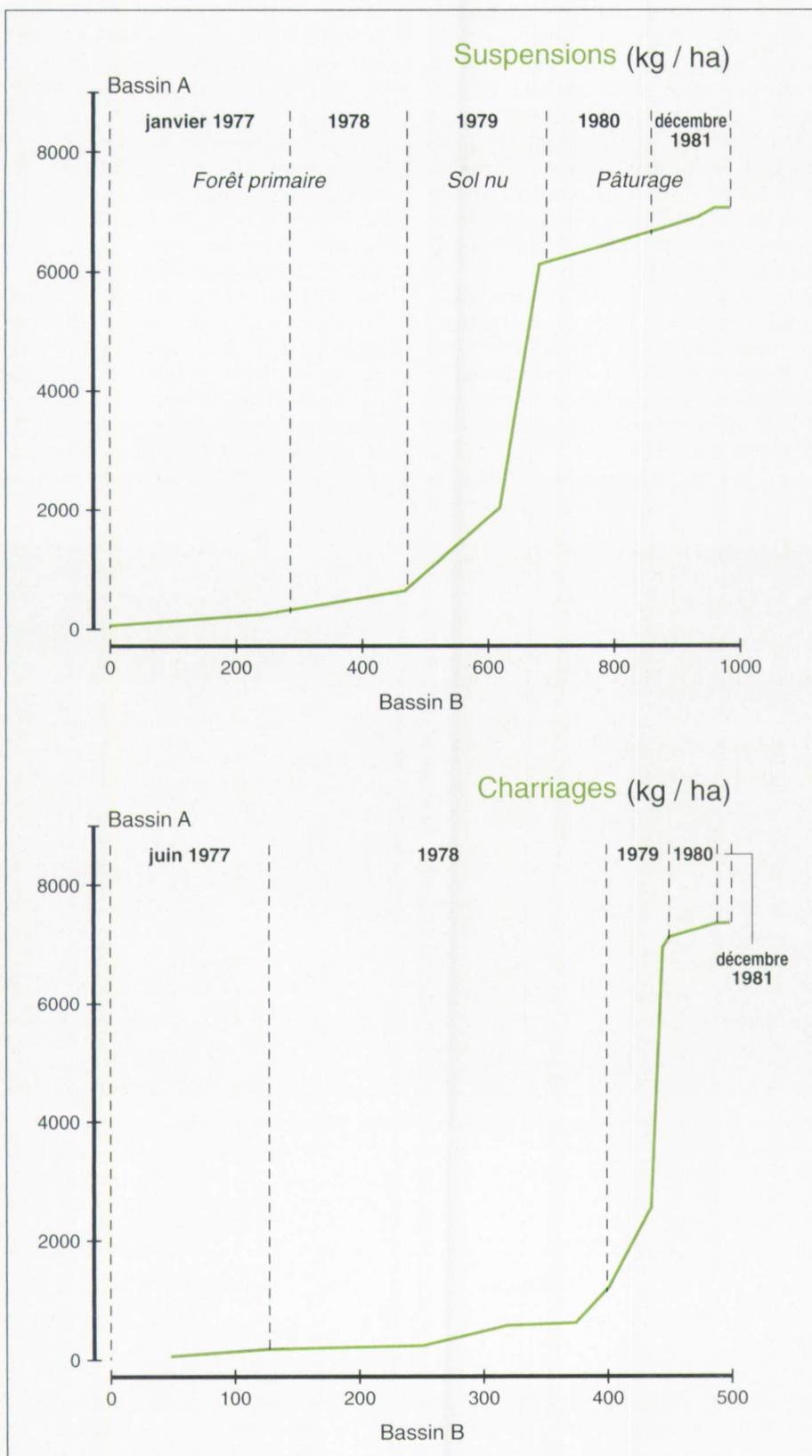


Figure 3. Évolution comparée des transports solides en suspension et en charriage sur les bassins expérimentaux Ecerex [5].

Figure 3. Comparative rate of solid transport (suspension or bed-load) in Ecerex experimental basins [5].

Références

1. Tinker PB. Soil science in a changing world. *J of Soil Sci* 1985 ; 36-128.
2. Lal R. Soil surface management in the tropics for intensive land use and high and sustained production. *Adv In Soil Sci*, 1986 ; 5 : 1-109.
3. Sanchez PA. Management of acid soils in the humid tropics of Latin America 63-107. In : *Management of acid tropical soils for sustainable agriculture*. Proc n° 2 IBSRAM, Bangkok, Thailand, 1987 ; 299 p.
4. Sarrailh JM. Mise en valeur de l'écosystème forestier guyanais (opération Ecerex). INRA et Centre Technique Forestier Tropical, 1990 ; 273 p.
5. Fritsch JM, Sarrailh JM. Les transports solides dans l'écosystème forestier tropical humide guyanais : effets du défrichement et de l'aménagement des pâturages. *Cah ORSTOM, sér Pédol*, 1986 ; XXII (2) : 209-22.
6. Chauvel A, Grimaldi M, Tessier D. Changes in soil pore-space distribution following deforestation and revegetation. An example from the Central Amazon Basin, Brazil. *Forest Ecology and Management* 1991 ; 38 : 259-71.
7. Hartmann C. Evolution et comportement de sols sablo-argileux ferrallitiques sous culture de palmiers à huile. Thèse Pédologie, Univ Paris VI, 1991 ; 201 p.
8. Pieri C. Fertilité des terres de savanes. Ministère de la Coopération et CIRAD, 1989 ; 444 p.
9. Lal R. Soil erosion and land degradation : the global risks. *Adv In Soil Sci* 1990 ; 11 : 129-72.
10. Roose E. Erosion et conservation des sols. Livre Jubilaire du Centenaire AFES, 1984 ; 321-33.
11. Valentin C. Surface crusting in two alluvial soils of northern Niger. *Geoderma* 1991 ; 201-22.
12. Bresson LM, Boiffin J. Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field. *Geoderma* 1991 ; 47 : 301-25.
13. Wischmeier WH, Smith DD. Predicting rainfall erosion losses — a guide to conservation planning. Agr Handd n° 537 USDA Govt Printing Office, Washington DC, 1978.
14. Raunet M. Le milieu physique et les sols de l'île de la Réunion. CIRAD 1991 ; 438 p.
15. Szabolcs I. Agronomical and ecological impact of irrigation on soil and water salinity. *Adv In Soil Sci* 1986 ; 4 : 189-218.
16. Chevry C. L'étude des phénomènes de salinisation : apport de la modélisation et de la simulation. Livre Jubilaire du Centenaire AFES, 1984 ; 273-9.
17. Kearney Foundation of Soil Science. Water penetration problems in irrigated soils. Annual reports 1987, 1988, 1989, 1990, University of California.
18. Burnett E. Land and water management practices for vertisols. In : *Management of vertisols*. Proc of an IBSRAM Inaugural workshop (1985 ICRISAT India), 1989 ; 133-45.
19. Jaillard B, Cabidoche YM. Étude de la dynamique de l'eau dans un sol argileux gonflant. *Science du Sol* 1984 ; 3 : 239-51.
20. Tessier D. Behavior and microstructure of clay water system. In : *Management of vertisols*. Proc of an IBSRAM Inaugural workshop (1985 ICRISAT India), 1989 ; 73-80.
21. Coughlan K, Smith GD, Yule DF. Soil physical research for improved dryland crop production on vertisols in Queensland Australia. In : *Management of vertisols*. Proc of an IBSRAM Inaugural workshop (1985 ICRISAT India), 1989 ; 87-99.
22. Smika DE, Unger PW. Effect of surface residues on soil water storage. *Adv In Soil Sci* 1986 ; 5 : 111-38.

tion sur le sol) sont importants. Les chiffres fournis dans le *Tableau 1* [2] sont très proches des précédents et viennent les compléter en ce qui concerne différents types de gestion de la forêt ou l'effet de la déforestation manuelle. L'analyse des mécanismes qui régissent ces phénomènes a été réalisée en Amazonie [6]. La déforestation mécanisée exerce un effet de compaction sur l'horizon supérieur du sol avec disparition des pores compris entre 0,1 et 100 μm . Il en résulte une imperméabilisation du sol, le ruissellement de l'eau et les autres phases classiques du cycle de l'érosion (entraînements solides...). De tels effets mécaniques sur une compaction de la structure des sols sont également mis en évidence en Côte d'Ivoire, lors de l'installation de plantations de vergers ou de palmiers [7]; par contre, certaines légumineuses et en particulier *Pueraria* sont capables de régénérer la porosité du sol par l'action de leur racine [6].

• Érosion

À l'heure actuelle, on assiste, à l'échelle du globe, à une recrudescence des phénomènes d'érosion. Celle-ci a de multiples causes : la déforestation, mais aussi le surpâturage, et l'intensification des cultures sous l'influence du facteur démographique. On constate que le sol est globalement de moins en moins riche en matière organique et de moins en moins couvert par les cultures [8].

Une table ronde organisée récemment sur la question par l'ORSTOM (Paris, décembre 1991) avait pour intitulé « Sauvons nos sols ». Il est certain que par certains côtés l'érosion, que ce soit

par le vent ou surtout par l'eau, peut être considérée comme un phénomène naturel à l'échelle géologique, mais on assiste actuellement à une accélération du processus sous l'influence anthropique. Ainsi, la perte annuelle en sol serait actuellement de 5 à 7 millions d'ha/an et selon la FAO, si l'érosion continue, 20 à 30 % des sols cultivables vont disparaître d'ici l'an 2000 [9].

Dans le passé, on s'est beaucoup préoccupé de formes d'érosion liées à la pente [10], mais les formes actuelles d'érosion par la pluie les plus répandues peuvent apparaître sur des reliefs relativement faibles. Elles sont, soit consécutives à une compaction de surface comme nous l'avons vu, soit à la destruction des mottes et des agrégats conduisant à une dégradation de la couche de surface du sol et à l'apparition de croûtes imperméables. L'eau peut alors ruisseler et entraîner les fractions fines qui vont colmater d'autres surfaces en aval. Toute une typologie de ces croûtes a pu être réalisée sur une base morphologique, génétique et hydrodynamique qui permet une bonne évaluation des risques [11].

Un parallèle entre le déroulement du processus d'érosion dans les régions nord et sud du globe a pu être établi [12], mais des études sont encore nécessaires pour cerner les nouvelles formes d'érosion qui ne sont pas toujours prévues par l'équation de Wischmeier et Smith [13].

Les formes d'érosion que nous avons décrites impliquent une destruction de la structure; en revanche, dans les andosols, l'érosion qui peut être très importante (20 à 60 t/ha à La Réunion), entraîne des particules de taille

sableuse qui sont en réalité des agrégats, mais qui ont une très faible densité [14]. Une telle forme d'érosion rejoint celle qui peut se produire lorsque la pente augmente.

• La salinisation

Un autre phénomène de dégradation des sols, à la fois chimique et physique, est lié à l'extension des phénomènes de salinisation secondaire liée à l'action de l'homme. Le principal facteur de cette salinisation est l'irrigation. La liaison est bien établie par Szabolcs [15] qui constate une augmentation de l'irrigation d'un facteur de 200 entre 1800 et 1980. Cette irrigation a bien sûr surtout été introduite dans les régions méditerranéennes, semi-arides et arides. En Egypte par exemple, 100 % des cultures sont irriguées avec souvent plusieurs utilisations successives de l'eau. De même, dans beaucoup de régions du nord, des problèmes d'aridité peuvent se poser; en culture intensive, on remédie maintenant à un déficit hydrique saisonnier par cette pratique. Ainsi, les USA ont vu doubler les surfaces irriguées entre 1949 et 1970 (elles atteignent maintenant 21 millions d'hectares). En France, si le maïs est en général irrigué, l'exemple de la Beauce (où la pluviométrie n'est que de 600 mm) est assez typique et l'on apporte maintenant quelques centaines de mm annuels même sur blé.

Avec l'irrigation, on entre dans un cycle que l'on pourrait dénommer infernal, mais qui est tout simplement géochimique : on constate inexorablement une augmentation de la salinisation secondaire liée à la fois à la mauvaise qualité des eaux mais aussi au lessivage des cations et à l'augmentation de l'évapotranspiration. Évidemment, l'intensité de cette salinisation dépend étroitement des conditions de drainage. Au Pakistan, sur 13,8 millions d'hectares irrigués, les sols salinisés après quelques années atteignent 2,1 millions d'hectares, et en Irak, Iran 50 % des sols irrigués seraient affectés [15]. Si cette salinisation secondaire affecte d'abord et très rapidement les zones méditerranéennes ou arides, elle peut intervenir dans les autres régions : Argentine, Canada...

La dégradation est évidemment chimique par les sels, éventuellement bio-

Tableau 1

Effets de la déforestation sur le ruissellement et l'érosion du sol de 1979 à 1981

| Méthode de déforestation | Ruissellement (mm) | Érosion du sol (t/ha ⁻¹) |
|---|--------------------|--------------------------------------|
| Forêt contrôlée | 0 | 0 |
| Traditionnelle | 6,6 | 0,02 |
| Manuelle | 47,7 | 5,0 |
| Coupe à blanc | 104,8 | 4,8 |
| Mécanisée (pour pousser, arracher les arbres) | 250,3 | 20,0 |

(d'après Lal [9])

logique lorsque les pesticides sont ajoutés dans l'eau d'irrigation et se concentrent (voir le désastre de la mer d'Aral qui a suivi la mise en culture irriguée du coton en amont). Mais la dégradation physique s'installe très tôt, dès qu'une faible teneur de Na est présente sur le complexe d'échange qui entraîne le gonflement des argiles et leur dispersion [16]. En Californie par exemple, un million d'hectares de terres irriguées pose actuellement des problèmes car la formation d'une croûte de surface empêche la pénétration de l'eau et donc la poursuite de l'irrigation [17].

Le *Tableau 2* donne quelques chiffres sur les sols affectés par les sels dans différentes régions du globe. Le total pourrait représenter 1/10 de la surface totale : les prévisions pour le début du XXI^e siècle annonçant 400 millions d'hectares ainsi affectés. Dans tous ces sols, si on peut remédier éventuellement aux problèmes chimiques en adaptant des plantes résistantes aux sels, il est beaucoup plus difficile de lutter contre les problèmes de dégradation physique.

• Autre contrainte physique : la disponibilité de l'eau

Nous n'avons évoqué que les contraintes pour les cultures qui ont augmenté durant les dix dernières années. Au niveau physique (*figure 2*), il faudrait citer les réserves et la disponibilité de l'eau qui constituent une contrainte primordiale dans les régions méditerranéennes, semi-arides et arides. Tout d'abord, citons le cas particulier des vertisols qui ne représentent que 2 %

des sols des tropiques (*figure 1*), mais dont les problèmes de mise en valeur se situent essentiellement au niveau du travail du sol et de la disponibilité de l'eau [18, 19]. Il s'agit-là d'un cas typique où des recherches à différentes échelles peuvent permettre de progresser à la fois dans la connaissance et l'application [20, 21].

De la même manière, des bilans précis des réserves en eau doivent être réalisés pour évaluer la valeur des pratiques agricoles. C'est le cas par exemple, pour la pratique des jachères au Maghreb qui bloque l'utilisation de millions d'hectares chaque année. Il est évident que l'introduction de nouvelles pratiques agricoles comme le semis direct ou la couverture du sol par des cultures de légumineuses ou des résidus de culture sont des solutions à envisager qui concernent à la fois la gestion de l'eau et la gestion de la matière organique [22, 23].

Dégradation chimique des sols

• La fertilité chimique

En raisonnant en terme de fertilité potentielle, les sols des régions sud du globe ont des contraintes chimiques beaucoup plus grandes que les contraintes physiques. A ce sujet, la bonne structure microagrégée des sols ferrallitiques est bien connue [24]. Il est donc particulièrement important de remédier à la faiblesse en éléments nutritifs pour obtenir une bonne production. Ces contraintes chimiques ont toujours existé et les sols ferrallitiques ou ferrugineux tropicaux (ultisols, oxi-

Références

23. Unger PW. Conservation tillage systems. *Adv In Soil Sci* 1990 ; 13 : 27-68.
24. Chauvel A. Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. Travaux et documents ORSTOM, 1977 ; 62 : 552 p.
25. Pédro G. La pédogenèse sous les tropiques humides et la dynamique du potassium. CR Colloque Inst Intern de la Potasse, Abidjan (Côte d'Ivoire), 1973 ; 23-49.
26. Kang BT. Nutrient management for sustained crop productions in the humid and subhumid tropics. In : *Nutrient management for food crop production in tropical farming systems*. Publ by Institute for soil fertility, Haren The Netherlands, 1989.
27. Fox RL, Yost RS, Saïdy NA, Kang BT. Nutritional complexities associated with pH variables in humid tropical soils. *Soil Sci Am J* 1985 ; 49 : 1475-80.
28. Theng BKG. Soils with variable charges. New Zealand, *Soc of Soil Sci* 1980 ; 488 p.
29. Sanchez PA, Salinas JG. Low-imput technology for managing oxisols and ultisols in tropical America. *Adv in Agron* 1981 ; 34 : 279-406.
30. Delvaux B. Constituants et propriétés de surface des sols dérivés de pyroclastes basaltiques du Cameroun Occidental. Approche génétique de leur fertilité. Thèse Faculté des Sciences Agronomiques, Univ Catholique Louvain, 1988.
31. Poss R. Transferts de l'eau et des éléments minéraux dans les terres de barre du Togo. Conséquences agronomiques. Thèse Univ Paris VI, 1991 ; Editions ORSTOM, 355 p.
32. Barea JM. Vesicular - Arbuscular Mycorrhizae as modifiers of soil fertility. *Adv In Soil Sci* 1991 ; 15 : 1-40.
33. Wright RJ. Soil aluminum toxicity and plant growth. *Comm In Soil Sci Plant Anal* 1989 ; 20 : 1479-97.
34. IBSRAM proceedings. Management of acid tropical soils for sustainable agriculture. Proceeding of an IBSRAM inaugural workshop, Bangkok Thailand, 1985 ; 299 p.
35. Pons LJ, Van Breemen N, Driessen PM. Physiography of coastal sediments and development of potential soil acidity. In : *Acid Sulfate Weathering. Soil Sci Soc of America* 1982 ; 8 10 : 1-18.
36. Kamprath EJ. Crop response to lime on soils in the tropics. In : *Soil Acidity and liming Agronomy n° 12*. Amer Soc of Agron Madison USA, 1984 ; 349-68.
37. Cabidoche YM, Van Oort F. Problèmes soulevés par la caractérisation, à l'échelle de la parcelle, du statut cationique des sols ferrallitiques de Guadeloupe. 25^e Congrès de la Société Caraïbe des plantes alimentaires, Gosier INRA Société Antilles, 1989.
38. Bell LC, Edwards DG. The role aluminium. In : *Acid soil infertility*. In : *Soil Management under humid conditions in Asia*. IBSRAM, 1987 ; 201-23.
39. Van Raij B. Fertility of acid soils. In : RJ Wright *et al. Plant soil interactions at low pH*. Kluwer Acad publishers, 1991 : 159-67.
40. Marschner H. Mechanisms of adaptation of plants to acid soils. In : RJ Wright *et al. Plant soil interactions at low pH*. Kluwer Acad publishers, 1991 ; 683-702.
41. Matsumoto H. Biochemical mechanism of the toxicity of aluminium and the sequestration of aluminium in plant cells. In : R J Wright *et al. Plant and soil interactions at low pH*, Kluwer Acad publishers, 1991 ; 825-38.
42. Aniol A. Genetics of acid tolerant plant. In : R J Wright *et al. Plant and soil interactions at low pH*. Kluwer Acad Publishers, 1991 ; 1007-17.

Tableau 2

Sols affectés par les sels dans différents continents et sous-continent (10³ hectares)

| | |
|------------------------------|---------|
| Amérique du Nord | 15 755 |
| Mexique et Amérique Centrale | 1 965 |
| Amérique du Sud | 129 163 |
| Afrique | 80 608 |
| Asie du Sud | 87 608 |
| Asie du Nord et du Centre | 211 686 |
| Asie du Sud-est | 19 983 |
| Australie | 357 330 |
| Europe | 50 804 |
| Total | 954 832 |

(d'après Szabolcs [15])

sols et partiellement alfisols de la classification américaine) sont appauvris en éléments minéraux (P, K, Ca, Mg, Zn, S), du fait même de leurs conditions de formation par forte hydrolyse des sols [25]. Leurs constituants argileux sont classés comme argiles à faible activité du fait de leur faible capacité à stocker les éléments nutritifs échangeables (Tableau 3) [26]. De même, du fait des températures élevées, la minéralisation de la matière organique est élevée et la teneur en composés humiques est faible, ce qui explique également les faibles valeurs de la capacité d'échange des sols et des réserves en N et P. La présence dominante de charges variables, le plus souvent positives dans les conditions de pH du sol, rend la gestion de la fertilisation plus

difficile du fait de la forte fixation des ions PO_4^- et de la faible rétention des cations de type potassium [27, 28]. Il est donc obligatoire, pour des justifications à la fois scientifiques et économiques, de concevoir une agriculture à faibles intrants [29]. Pour les fertilisants de type cationique, les recherches actuelles, prenant mieux en compte les minéraux argileux et leur sélectivité [30], ou établissant des bilans précis du potassium [31], devraient permettre de mieux fertiliser ou de mieux adapter les systèmes agricoles. Dans le cas des phosphates, qui représentent une contrainte importante pour les sols des tropiques humides [3], leur blocage au niveau des composés du fer et de l'aluminium oblige à concevoir des formules nouvelles d'apport (utilisation des

phosphates naturels ou résidus industriels moins solubles ou de phosphocomposts) ou des plantes mieux adaptées (nouvelles variétés peu exigeantes en P, développement de la mycorhization) [32].

• La phytotoxicité aluminique

Cependant, la contrainte la plus limitante qui doit être levée avant de fertiliser concerne l'acidité naturelle des sols tropicaux et son corollaire qui est la phytotoxicité aluminique. Si on se réfère à la figure 4 tirée de Wright [33], on peut considérer qu'au moins 20 % des sols du globe sont acides. D'après les chiffres de l'IBSRAM [34] et si on se réfère à l'abondance des oxisols et ultisols (figure 1), il y aurait dans les tropiques 38 % de la surface

Tableau 3

Propriétés de la couche supérieure (0-15 cm) de quatre sols en climat tropical humide

| Sols | pH eau | C organique (%) | Cations échangeables (meq/100 g) | | | | | CEC effective (meq/100 g) | Saturation par Al (%) |
|---|--------|-----------------|----------------------------------|-----|------|-----|-----|---------------------------|-----------------------|
| | | | K | Ca | Mg | Al | H | | |
| Alfisol (paleustalf) Nigeria | 6,2 | 1,4 | 0,3 | 4,6 | 1,5 | 0 | 0,1 | 6,3 | 5,6 |
| Ultisol (paleudult) Nigeria | 4,3 | 1,2 | 0,04 | 0,2 | 0,05 | 1,8 | 0,5 | 2,8 | 64 |
| Oxisol (Haplorthox) Zaïre | 3,8 | 1,4 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 1,7 | 1,2 | 3,3 | 53 |
| Oxisol (Haplorthox) Bassin Amazonien Brésil | 4,7 | 3,9 | 0,1 | 0,3 | 0,1 | 2,8 | 0,5 | 5,0 | 56 |

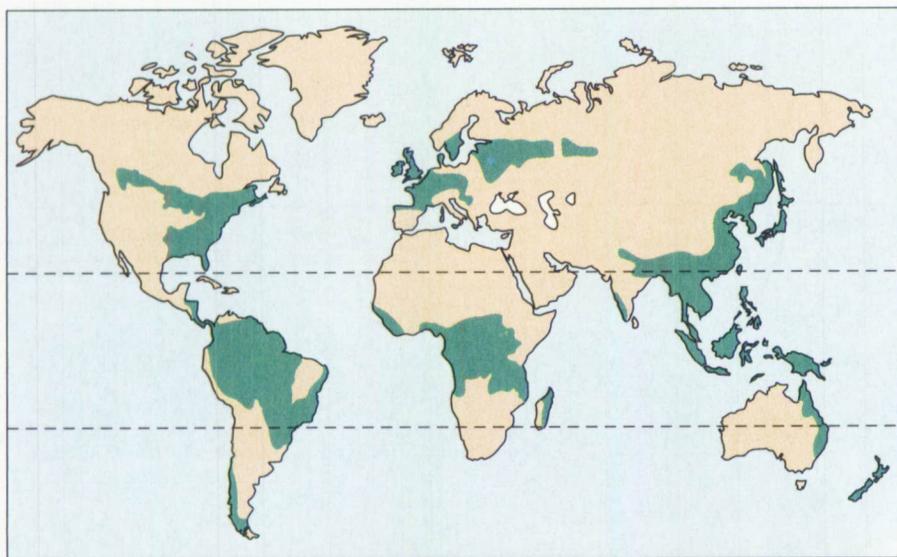


Figure 4. Représentation de l'extension des sols acides à l'échelle du globe [33].

Figure 4. Major areas of naturally-acidic soils [33].

totale des terres concernées ; dans la partie asiatique, ce sont 333 millions (soit pratiquement 50 % des sols) [29] et 51 % des sols de l'Amérique tropicale. Cette contrainte est liée là aussi, au phénomène général d'altération et de formation des sols avec entraînement des bases [25] ; cependant, on doit citer aussi l'application des fertilisants ammoniacaux, l'irrigation, et l'intensification des cultures.

Il faudrait aussi comptabiliser les dix millions d'hectares de sols sulfates acides développés principalement dans les deltas par oxydation du soufre et de la pyrite qui sont situés dans des zones particulièrement sensibles (Chine, Vietnam, Indonésie, Niger, Gambie, mais aussi la Hollande), à cause de la densité de la population dans ces régions [35].

L'aluminium monomérique en solution a une influence directe et néfaste à des

teneurs supérieures au ppm sur la croissance des plantes et la récolte. Il en serait de même pour le développement de nombreux microorganismes par exemple (*Rhizobium*). La concentration d'aluminium en solution augmente lorsque le pH s'abaisse et devient inférieur à 5,5 et elle est en relation avec la désaturation du complexe d'échange des sols [36] ; il faut noter que la relation est plus complexe dans la mesure où le montant absolu d'Al dépend de la capacité d'échanges cationiques (CEC) qui diminue avec l'évolution du sol par altération (ultisol → oxisol). La meilleure base pour décrire les risques de phytotoxicité et proposer des remèdes est donc de se baser sur le rapport Al/cations saturant cette CEC. Aux Antilles, la phytotoxicité aluminique peut être ainsi plus accentuée lorsque des minéraux 2/1 (illite, smectite) en cours d'altération subsistent dans les sols [37].

La gestion de ces sols acides reste complexe. Il est certain que de faibles apports de CaCO_3 peuvent avoir un effet important, de même des apports

de matière organique peuvent diminuer la phytotoxicité [38] ; les apports de gypse sont également expérimentés [39]. Cependant, si on considère à la fois l'importance de cette contrainte aluminique dans des sols essentiels pour le développement et la production agricole, et les difficultés actuelles rencontrées pour lutter contre cette contrainte du milieu au niveau du sol, il est certain qu'il faut investir plutôt du côté des plantes. Si l'on connaît mieux actuellement, à la fois les mécanismes physiologiques d'adaptation des plantes à l'acidité [40] et la biochimie de la toxicité [41], il reste cependant à appliquer ces connaissances au niveau de la génétique de plantes tolérantes [42].

Dégradation biologique des sols

Comme d'autres composantes des écosystèmes naturels, les sols constituent une source de diversité génétique importante : source particulière-

ment difficile à recenser dans la mesure où par exemple 90 % des bactéries du sol ne sont pas connues (Bardin, communication orale). La dégradation biologique se traduit par une diminution de la matière organique, et corrélativement par une diminution de la faune et de la microflore. Cette dégradation apparaît déjà consécutive à la déforestation et à la mise en culture. Plus la culture sera intensive, plus elle utilisera d'intrants (fertilisants et surtout pesticides) et plus la vie du sol sera pauvre. La faune (macrofaune et microfaune) apparaît la plus sensible. En revanche, les méthodes microbiologiques actuelles ne sont pas toujours adéquates pour évaluer les changements qui peuvent être très variés. La microflore semble capable de s'adapter aux éléments toxiques exogènes. Mais les sols acides des forêts tropicales et de landes ne sont pas favorables au développement des champignons du genre *Pythium* qui provoquent de nombreuses maladies. Cette résistance apparaît liée à une fungitoxicité aluminique et les *Pythium* se développe-

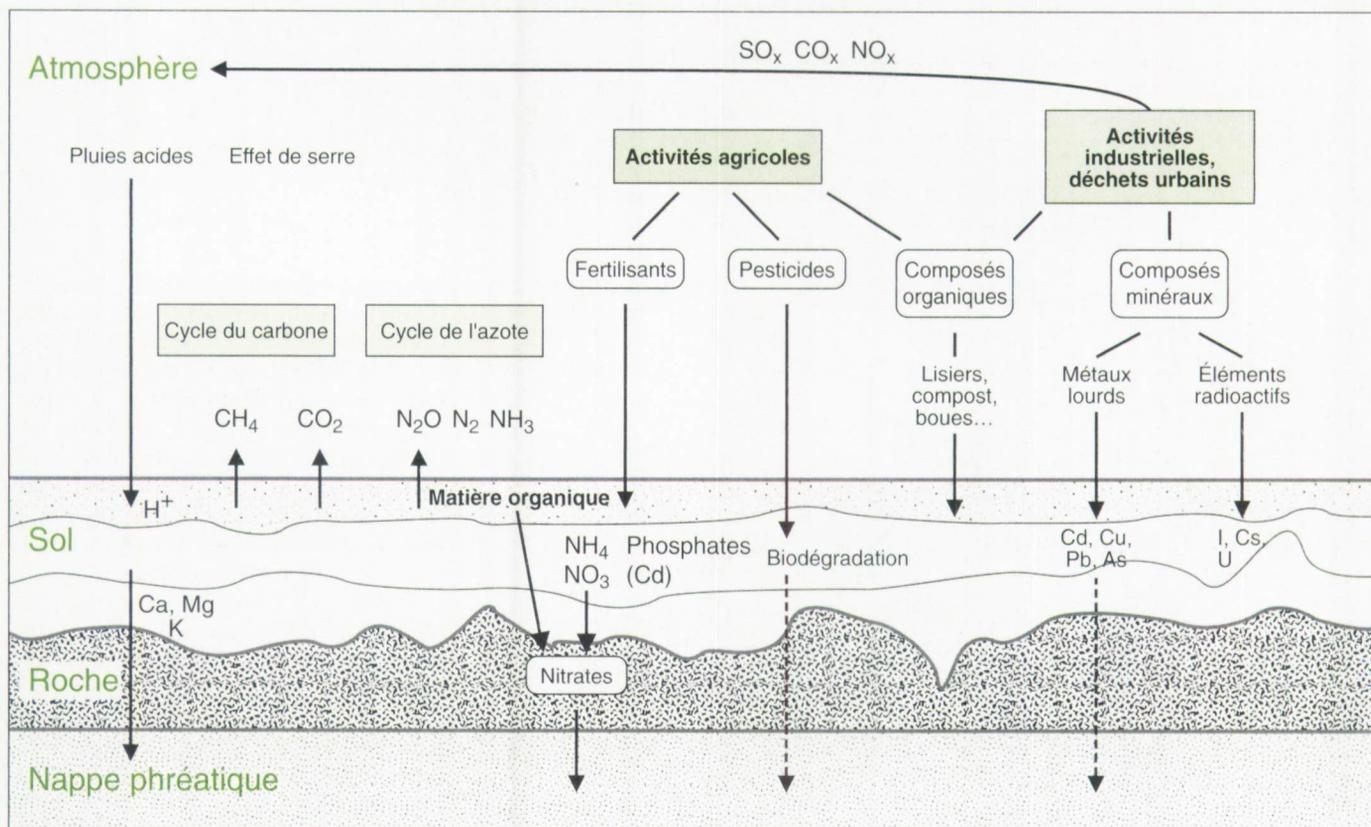


Figure 5. Le sol comme une interface dans l'environnement : principaux types de polluants transitant par les sols.

Figure 5. The soil as environmental interface : main types of pollutants which pass through the soils.

ront avec l'élévation de pH consécutive à la culture [43]. De tels phénomènes de dégradation biologique se retrouvent de manière assez semblable au nord comme au sud du globe. Remédier à cette dégradation implique de reconstituer un stock correct de matière organique, une tâche particulièrement difficile pour l'avenir.

Le sol et l'environnement : le cas des régions Nord du globe

Bien que les problèmes d'environnement se posent de plus en plus à l'échelle planétaire, la sensibilité est, pour l'instant, beaucoup plus grande dans les pays du nord qui ont vu se développer, à la fois, une agriculture et une industrialisation intensives accompagnées parfois d'une concentration urbaine importante.

Le sol se forme par l'action directe de l'atmosphère, de la biosphère et du climat sur la lithosphère. Le sol se situe donc par essence à l'interface entre ces différentes composantes de l'environnement (figure 5) et c'est ce qui rend son rôle si important et sa pollution si dangereuse. Précisons bien que pour ces problèmes d'environnement, c'est l'action de l'homme qui devient le facteur essentiel.

• Les échanges sol-atmosphère

En ce qui concerne les échanges avec l'atmosphère, on voit que le sol reçoit directement un certain nombre de substances : oxydes d'N, oxydes de S, retombées de métaux lourds (Pb...) (figure 5). Toutes ces substances apparaissent liées à la pollution et en particulier à la combustion des énergies fossiles.

La figure 6 représente une carte des valeurs de pH des eaux de pluie aux USA qui pose bien le problème des pluies acides. On se rend compte que ces valeurs diminuent d'ouest en est et descendent au-dessous de 4,5 dans les zones les plus industrielles. Au niveau de l'Europe, les valeurs de pH diminuent généralement du sud au nord et d'ouest en est ; les apports de protons qui sont seulement de 0,8 kg équiva-

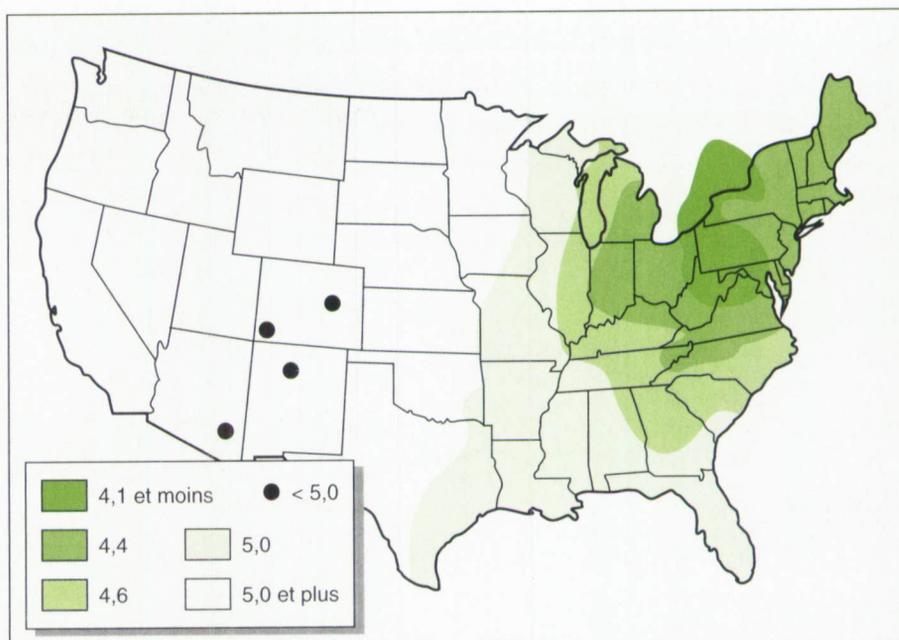


Figure 6. Carte du pH des eaux de pluie aux USA (Source : US Environmental Protection Agency).

Figure 6. pH of the rain in the US.

lent par hectare en Allemagne de l'ouest passent à 6 kg en Tchécoslovaquie [44]. Pour les Vosges, les bilans de protons sont actuellement entre 3 et 4 kg/eq/ha/an pour des sols qui sont déjà particulièrement désaturés en cations ($S/T < 10\%$) [45].

L'Europe de l'Est est particulièrement concernée du fait de l'utilisation d'une lignite riche en soufre et la pollution catastrophique qui en résulte atteint aussi bien l'air, le sol, l'eau, les monuments historiques que les êtres vivants [46]. A cette acidification d'origine atmosphérique vient s'ajouter celle provenant de l'oxydation des engrais ammoniacaux. Il est possible et même nécessaire d'y remédier par un chaulage d'entretien dans les sols de culture suffisamment riches, mais dès que l'on se trouve sur des sols pauvres comme la plupart des sols de forêts du Nord de l'Europe et de l'Amérique, des problèmes importants d'acidité des sols et des eaux se posent, accompagnés de phénomènes de dépérissement (forêts) ou de toxicité (plantes, poissons...). Ainsi, entre 1927 et 1982 un abaissement du pH de 0,3 à 0,9 unités a été mesuré sur 90 sols du sud-ouest de la Suède [47]. La réalisation de bilans des réserves en cations basiques des sols est en cours au niveau européen pour évaluer les risques à long terme.

Toujours dans ces échanges avec l'atmosphère, le sol apparaît comme un élément essentiel dans le cycle du carbone et l'effet de serre. Comme on peut le voir dans le Tableau 4 [48], ce n'est pas la végétation qui contient le plus de C mais le sol. Ce dernier compartiment peut être soumis à des minéralisations accélérées après déforestation, mais aussi et surtout dans les régions boréales, en particulier si l'effet de serre amorcé provoque une élévation de température du globe. Il ne faut pas non plus oublier la récente augmentation de la volatilisation de CH_4 (+ NH_3 , N_2O , NO_x et N_2 par dénitrification) liée à l'augmentation de la riziculture irriguée en Asie qui peut jouer sur l'effet de serre dans l'atmosphère.

Les échanges gazeux jouent également pour l'azote dans un sens bénéfique lorsqu'il y a fixation de N par les bactéries ou les algues, mais il ne faudrait pas trop jouer sur la réaction inverse pour se protéger de l'augmentation des nitrates : la volatilisation de N présent dans des lisiers et les fumiers (40 % de N vont être volatilisés sous forme de NH_3) ou dans les eaux des sols (dénitrification) peut être un facteur important de l'effet de serre dans quelques années. Dans le cas de C comme de N, on a affaire à des cycles qui intéressent toute la planète.

Tableau 4**Les échanges de carbone entre les différents écosystèmes terrestres et l'atmosphère (valeurs en Pg [10¹⁵ g de C])**

| | |
|--|-------|
| Stocks (Pg) | |
| dans l'atmosphère | 750 |
| dans la végétation | 560 |
| organique dans le sol | 1 450 |
| Flux (Pg/an) | |
| prélèvement par les plantes | 120 |
| libération par les plantes | 60 |
| libération par la litière et le sol | 60 |
| libération par les combustibles fossiles | 5,5 |
| libération nette par déforestation | 1 |
| Changements (Pg/an) | |
| dans l'atmosphère | 3 |
| addition nette à l'Océan | 3 |

(d'après Vitousek [48])

C'est bien sûr le sol qui reçoit tout ce qui est poussières ou apports d'éléments radioactifs venant de l'atmosphère. Ainsi, dans une grande partie des pays de l'Europe du Sud (Grèce, Italie), ou du Nord, on a assisté après Tchernobyl, à la fixation immédiate de l'iode et surtout du Cesium radioactif à la surface du sol. Si pour l'iode les problèmes ont été très vite réglés, (période de 8 jours), une radioactivité importante liée au ¹³⁷Cs restera dans les quelques premiers centimètres des sols durant plus de 30 ans (valeur de la demie-vie). En Ukraine, une surface de sols de plus de 25 000 km² est ainsi condamnée ; en Biélorussie 20 % des sols seraient impropres à l'agriculture. Le passage dans la végétation étant relativement aisé, les risques de contamination des plantes, des eaux et des hommes existent.

• Fertilisation et qualité de l'eau

Actuellement, l'un des problèmes numéro un de la pollution des eaux par les activités agricoles se produit par l'intermédiaire des sols et concerne les nitrates. Les causes sont faciles à analyser et déjà le rapport Hénin [49] faisait le point pour la France, avant que le grand public ne soit sensibilisé. Les causes sont connues : fertilisation trop élevée par rapport aux besoins saisonniers des cultures, manque de couverture du sol à l'automne, conjonction d'apports divers (fumiers, lisiers, composts) pas assez pris en compte dans

le bilan azoté. Les problèmes se posent dans les sols peu épais ou très filtrants : en Champagne pouilleuse, les nitrates qui n'ont pas été utilisés par les plantes ni fixés par le sol descendent avec l'eau dans la porosité de la craie à raison de 50 cm par an, ils atteindront la nappe qui se situe à une profondeur de 20 mètres en une quarantaine d'années [50]. En Beauce, les nitrates après avoir traversé le sol de limon, utilisent un système karstique dans le calcaire de Beauce et peuvent se retrouver en quelques jours dans la nappe (Photo 2). Dans les sols sableux des Landes, l'irrigation fertilisante du maïs doit être rigoureusement adaptée aux besoins des cultures, dans la mesure où tout ce qui n'est pas retenu, passe immédiatement dans la nappe des Landes. En Bretagne, zone actuellement particulièrement touchée, il faudra évidemment trouver une solution pour l'utilisation des lisiers. Il est certain que l'utilisation des isotopes fournit un outil précieux pour préciser la dynamique de l'azote et en particulier les phases d'aérobiose ou d'anaérobiose et donc de nitrification et dénitrification [51]. Ce problème des nitrates devrait être réglé par l'établissement de bilans stricts des nitrates directement pour l'exploitation, bien que les surprises soient toujours possibles du fait des interférences entre les événements climatiques et les processus biologiques qui régulent la nitrification. Il ne faut pas oublier que le

« gel des sols » préconisé dans le cadre de la CEE n'empêchera pas la nitrification naturelle des sols*. On peut aussi songer pour l'avenir, à une meilleure utilisation de la dénitrification dans les bas fonds (en tenant compte des limites imposées à long terme par l'effet de serre), à des nouvelles formes d'engrais peu solubles, par exemple à base d'urée enrobée (*coated fertilizers* [53]) qui peuvent libérer l'azote pendant une période relativement longue (> à 100 jours).

En France, la fertilisation phosphatée ne pose pas encore un réel problème vis-à-vis de l'eutrophisation des eaux [54], si on considère la prépondérance des apports urbains par les lessives et fosses d'aisance [55]. Par contre, en Bretagne, la conjonction des apports par la fertilisation et par les lisiers est déjà la cause d'une certaine eutrophisation dans les eaux océaniques côtières (développement d'algues). Une meilleure spéciation du phosphore dans les différents types de sols est nécessaire pour prévenir tout problème [56, 57], et dans les systèmes d'agriculture intégrée développés aux Pays Bas un contrôle des apports est déjà proposé [58].

• Les pesticides

Une des pollutions les plus graves pour l'agriculture, est le devenir et la persistance éventuelle des pesticides dans les sols. Nous ne reviendrons pas sur les discussions concernant les justifications actuelles de l'emploi de pesticides chimiques, mais on constate une augmentation de leur utilisation qui a doublé depuis une vingtaine d'années. Il s'agit souvent de molécules complexes avec des réactions d'adsorption-désorption sur les constituants du sol et de dégradations chimiques et biologiques très difficiles à prévoir dans les conditions réelles des sols. Le problème se pose en général plusieurs années après, lorsque l'on retrouve ces composés ou leurs produits de dégradation dans l'eau. Aux USA par exemple, on a pu détecter un certain nombre de pesticides, (allant jusqu'à 67 produits différents) dans l'eau dans la moitié des états. Les herbicides de type atrazine, qui ont été les plus utilisés

* Des estimations récentes prévoient une augmentation des teneurs en nitrate des nappes entre 1 et plus de 4 mg/an [52].



Photo 2. Profil de sol sur calcaire de Beauce. De haut en bas : sol brun calcique à 30 % d'argile, calcaire cryoturbé puis calcaire pulvérulent. Ce calcaire est fissuré : l'eau, avec sa composition acquise dans le sol, passe directement dans la nappe phréatique. (Cliché A. Bruand).

Photo 2. Soil on limestone profile in Beauce (France). From top to bottom : brown earth at 30 % clay, congeliturbated limestone then pulverulent limestone. The limestone is fissured : the water, and components acquired in the soil, passes rapidly into the ground-water table.

ces trente dernières années sont ceux que l'on retrouve le plus fréquemment dans les eaux potables et en particulier dans celles du *corn belt* [59]. En Europe, on a surtout des estimations (CEE) pour lesquelles 80 % des eaux superficielles auraient plus de $0,4 \mu\text{g}$ d'atrazine (la norme CEE pour les eaux potables est de $0,1 \mu\text{g}$). En France, les études faites par les agences de bassin sont récentes et incomplètes, mais 50 à 60 % des ressources en eau pourraient contenir de l'atrazine. Si la toxicité de ces produits doit être relativisée, le danger existe pour l'avenir avec des composés plus toxiques difficiles à détecter [60], le lindane provoque par exemple des accidents sur les poissons. Il est certain qu'à terme, les moyens de lutte devront évoluer vers la prévention, vers la lutte biologique accrue (microorganismes pathogènes ou entomophages) ou une lutte intégrée, voire

l'utilisation de toxines spécifiques, d'enzymes, d'hormones. Mais actuellement et pour un certain nombre d'années, les pesticides chimiques sont et seront utilisés.

• Les résidus organiques

On doit considérer maintenant de plus en plus l'utilisation des sols comme récepteur ou système épurateur vis-à-vis des déchets industriels ou urbains. Le rôle du sol en tant que réacteur biologique est un rôle important qui peut bien fonctionner s'il est parfaitement contrôlé [61]. N'oublions pas que le sol peut contenir par gramme de terre, si on se limite aux seuls microorganismes, 10^8 bactéries, 10^6 actinomycètes, 10^5 champignons, des algues, protozoaires...

Le sol peut ainsi naturellement biodégrader ou plus précisément biominéraliser sous forme de CO_2 et NH_3 , les composés organiques tels que les lisiers, composts et un certain nombre de résidus des industries agroalimentaires (sucreries, brasseries, laiteries...) (figure 5) ; en choisissant les types de sol bien drainant, les doses et les saisons d'apport, on peut avoir un rendement de transformation de 500 kg de matière organique/ha/jour qui pourrait être multiplié par 10 si le transfert de l'oxygène est augmenté [61]. Le problème devient déjà plus hasardeux lorsque l'on veut faire biodégrader au sol des composés de type hydrocarbures (essence, gazol, huiles) ou des produits chimiques plus complexes d'origine industrielle. Le sol peut alors être utilisé comme un bio-réacteur « industriel » avec apport éventuel d'oxygène et de microorganismes. La bactérie *Bacillus thuringiensis* est par exemple capable de dégrader les molécules organiques et de concentrer les métaux lourds [62].

On veut également conférer aux sols un rôle dans l'épuration des eaux et résidus urbains. Effectivement en France, les champs d'épandage d'Achères mis en place au XIX^e siècle ont été momentanément un moyen d'épurer les eaux de Paris, mais le rendement d'un tel système (50 à $500 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$) s'est révélé très vite insuffisant pour les grandes villes et les risques de pollution par les métaux lourds trop grands. Ainsi, dès 1930, les champs d'Achères ont été remplacés par des procédés plus industriels avec

Références

43. Lourd M, Bouhot M. Recherches et caractérisation de sols résistants aux *Pythium* sp en Amazonie Brésilienne. *Bull OEPP/EPPO* 17, 1987 ; 569-75.
44. Van Breemen N, Mulder J, Driscoll CT. Acidification and alkalization of soils. *Plant and Soil* 1983 ; 75 : 283-308.
45. Bonneau M, Dambrine E, Nys C, Ranger J. Apports acides et cycle des cations dans des peupliers du nord-est. Intérêt de bilans saisonniers. *Science du Sol* 1991 ; 125-45.
46. Moldan B, Sshnoor JL. Czechoslovakia, examining a critically ill environment. *Environ Sci Technol* 1992 ; 26 : 14-21.
47. Hallböcken L, Tamm CO. Changes in soil acidity from 1927 to 1982-1984. In : *A forest area of South-West Sweden*. *Scand J For Res* 1986 ; 1 : 219-32.
48. Vitousek PM. Can planted forests counteract increasing atmospheric carbon dioxide ? *J Environ Qual* 1991 ; 20 : 348-54.
49. Hénin S. Activités agricoles et qualité des eaux. Rapport Ministère de l'Agriculture et de l'Environnement, Paris 1980.
50. Mariotti A, Landreau A, Simon B. ^{15}N isotop biogeochemistry and natural denitrification process in ground water : application to the chalk aquifer of northern French. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 1988 ; 52 : 1869-78.
51. Vachier P, Dever L. Qualité des eaux de recharge de la nappe et pratiques agricoles en pays de craie. Cas de la Champagne, Colloque nitrates, agriculture, eau ; Paris, novembre 1990, 251-6.
52. Pollution des nappes d'eau souterraine en France. Rapport de l'Académie des Sciences, 1991 ; 29 : 183 p.
53. Fujita T, Maeda S, Shibata M, Takahashi C. Research and development of coated fertilizer. Proc of the Symp Fertilizer, Present and Future, 1989 ; 78-100.
54. Dorioz JM, Pillelowe E, Ferhi A. Dynamique du phosphore dans les bassins versants : importance des phénomènes de rétention dans les sédiments. *Water Res* 1989 ; 23 : 147-58.
55. Barrouin G. La réhabilitation des plans d'eau. *La Recherche* 1991 ; 238 : 1412-22.
56. Sposito G. Chemical models of inorganic pollutants in soils. *Critical Reviews in Environmental Control* 1984 ; 15 : 1-24.
57. Barrow NJ. The reactions of plant nutrients and pollutants with soil. *Austr J Soil Res* 1989 ; 475-92.
58. Spiertz Integrated agriculture in the Netherlands. In : *Quelles fertilisations demain ?* Strasbourg, septembre 1991 ; COMIFER, Paris, 1991 : 52-63.
59. Belluck DA, Benjamin SL, Dawson T. Ground-water contamination by atrazine and its metabolites. In : Transformation products. American Chemical Society Symposium, series 459, 1991 ; 254-73.
60. Belamie R, Giroud S. Aperçu des pollutions liées à l'utilisation des pesticides par l'agriculture en France. Etude CEMAGREF Lyon, 1986.
61. Germon JC. Le sol, un système épurateur efficace... s'il est bien géré. *Rev du Palais de la Découverte* 1985 ; 133 : 19-41.
62. Bourquin AW. Les microorganismes au secours des sites pollués. *Biofutur* 1990 ; 93 : 24-37.
63. Delas J, Delmas J, Demias C. Étude par dilution isotopique du cuivre incorporé dans les sols depuis 70 ans. *CR Acad Sci* 1960 ; 250 : 3867-9.

Summary

The soil : a natural resource to be preserved both for production and the environment

M. Robert

The aim of this paper is to elucidate the importance of soil in both the northern and southern regions of the globe.

In the southern regions of the planet, arable soil represents nearly 2 154 millions hectares, although these are mainly oxisols and ultisols. The main causes of recent degradation (physical, chemical and biological) in these soils are reviewed.

In large tropical forests, the main result of deforestation, especially when performed mechanically, is a compaction of the soil which leads to a disappearance of the surface layers' porosity, and to erosion. Other factors such as over-grazing and over-farming lead to a disturbing acceleration of wind-borne, and especially rain-borne erosion. The first stage is the destruction of aggregates and the formation of impermeable crusts.

Secondary salinization due to irrigation and poor drainage is also in the increase. The degradation is chemical due to the salts and physical due to the dispersion effect on the clays. Water availability is also a major, and ever-increasing, problem.

The essential limiting factors of southern soils are their low chemical fertility (P and K), their acidity and aluminium-based phytotoxicity related to the degree of alteration. 20 % of the world's soils are affected by aluminium-based phytotoxicity ; in

the tropics, this figure reaches 40 to 50 %. This is very hard to remedy in the soil, the future lies in plant adaptation.

Biological degradation is often associated with other types of degradation but it is clear that intensive farming, its methods (ploughing) and agricultural inputs (pesticides) are a main reason for biological impoverishment, and this itself is linked to that of organic matter.

In the second part, the role of soil in the environment is considered ; this aspect is of more importance in the northern regions of the globe.

The soil formed by the effect of the biosphere's atmosphere and the climate on the lithosphere is at the interface of these various components of the environment. Acid rain and its influence on the soil, the soil's role in the greenhouse effect (C and N cycles), and the fixation of radioactive elements (¹³⁷Cs) from Chernobyl in the first few centimetres of soil are discussed in terms of soil-atmosphere exchange.

Farming-practice and fertilisation especially have a direct influence on the quality of water. Even with assessments being made and input being monitored, the nitrate level in the water table will increase, as it will for pesticides. If well managed, the soil can be a good biological reactor for all C- and N-based compounds

(liquid manure, compost, industrial and urban waste). The same cannot be said for heavy metals and very strict legislation must be enforced.

In the northern regions, intensive farming has caused a substantial increase in soils' tendency to erosion ; the mechanism is the same as in the south.

To conclude, arable soil is limited (22 % of the surface) and all the abovementioned degradations will increase even further. The soil must be considered as a non-renewable resource, and one which needs to be protected.

The problems facing the north and south have been dichotomised, yet in fact the two are converging more and more. Erosion due to rain is becoming more significant in the northern hemisphere and environmental problems are spreading even wider in the south (pesticides, acid rain, greenhouse effect, waste, water quality...). Sustainable agriculture using little agricultural inputs must be put into practice. This type of farming should make the methods fit the agroclimatic potential. Soil must be taken more seriously into consideration, but the way it is thought about (importance of various levels of organisation, biological...) should change too.

Cahiers Agricultures 1992 ; 1 : 20-34.

boues activées qui ont un rendement 100 fois meilleur. Notons que le procédé sur sables et sols sableux est cependant toujours d'actualité pour les petites villes et dans les pays en voie de développement, ce qui ne va pas sans poser d'ailleurs des problèmes d'hygiène et de pollution.

Dans le cas des boues d'épuration et des ordures ménagères, le sol semble encore devoir jouer un rôle comme système épurateur. Il est effectivement tentant de se débarrasser des déchets

en essayant de plus de remédier au déficit en matière organique des sols. A ce niveau, il existe un principe directeur : le sol peut dégrader des substances organiques en les minéralisant ou éventuellement en les transformant en humus ; en revanche, tout métal qui arrive au sol va s'accumuler ou passer dans les eaux. Les normes des « composts propres » ou des autres produits arrivant au sol doivent donc être particulièrement sévères sur le contenu en métaux lourds.

• Les métaux lourds

Le gros problème actuel de pollution des sols est effectivement lié aux apports de métaux dits lourds dans l'environnement, dans la mesure où un certain nombre d'entre eux (Cd, Hg, Pb, As et dans une moindre mesure Cu et Zn) sont toxiques pour l'homme. Il faut pour cela que l'élément chimique ait parcouru toute la chaîne alimentaire (à moins qu'il ne passe directement par l'eau).

Ces apports de métaux lourds sont déjà

liés à l'activité agricole. Les traitements de la vigne par la bouillie bordelaise (Cu SO_4) ont apporté depuis 70 ans des doses considérables de cuivre, parfois voisines de 1 000 kg/ha [63] dans les sols de vigne (qui représentent 1,3 million d'ha en France). Mais il se trouve que cet élément est relativement immobile dans le sol, et généralement non phytotoxique pour la vigne si le pH reste assez élevé. Les épandages de lisiers apportant Cu et Zn, et certains phosphates (phosphates naturels mais également superphosphates) sont une source importante de Cd (de 10 à 150 mg/kg de P_2O_5).

Mais les principales sources de pollution pour les autres métaux lourds sont les résidus urbains (boues d'épuration et composts urbains), les déchets et rejets industriels et la circulation automobile sur les axes routiers (plomb). Pour la France 1 million d'hectares de sols sera pollué, à terme de 40 ans par les métaux lourds [64] : ceci représente 2 % du territoire ou 3 % de la surface agricole. On retrouverait des chiffres voisins et des sources de pollution analogues pour les principaux pays du nord des continents européens et américains [65].

Dans les sols actuellement pollués, des travaux sont encore nécessaires pour mieux connaître la spéciation des différents métaux dans les diverses conditions pédologiques. Il faudrait ensuite savoir les bloquer (notion de barrière) pour qu'ils ne contaminent pas les eaux et les plantes. En ce qui concerne la « bioremédiation » des sols [62], c'est-à-dire leur décontamination, les solutions techniques doivent encore être expérimentées, et elles apparaissent si onéreuses, que cela semble une utopie. La seule solution est vraiment de protéger les sols contre la pollution puisqu'il s'agit de ressources non renouvelables.

• L'érosion des sols

Nous avons évoqué les problèmes d'érosion dans les régions sud du globe : on retrouve en réalité des phénomènes très analogues liés à l'action de la pluie dans les régions nord de l'Europe et de l'Amérique. En Europe par exemple, 25 millions d'hectares sont concernés [66]. Les facteurs sont à la fois pédologiques (texture limoneuse plus sensible, faible taux de matière organique) et agronomiques. Parmi les trois mécanismes fondamentaux qui expliquent l'action de

la pluie sur la surface du sol, (éclatement, effet mécanique et microfissuration), le mécanisme prépondérant sur les sols limoneux des régions tempérées est le plus souvent l'éclatement [67, 68] (*Photos 3, 4 et 5*) ; pour les sols sableux et dans les zones arides, en revanche, c'est souvent l'action mécanique des gouttes d'eau [11]. On retrouve le rôle néfaste des cultures intensives, la non-couverture du sol pendant la saison des pluies. Par exemple d'après Keeney [69, 70], dans le nord-est des Etats-Unis (*Corn belt*), la production de 1 kg de maïs entraîne la perte de 2 kg de sols. Aux aspects de perte en sol viennent s'ajouter les problèmes liés au transport et dépôt de matériaux en aval et une contribution notable à la pollution chimique (entraînement des phosphates, pesticides... fixés aux particules).

Conclusion

Comme le montre la *figure 7* [71-74], les ressources en sol réellement cultivables sont limitées. Ces auteurs indiquent les contraintes qui font que 78 % de la surface des sols du globe ne sont pas cultivables. Parmi les 22 % restants, seule la moitié est actuellement cultivée, mais il faudrait tenir compte, en particulier, dans les régions sud, des principales contraintes que nous avons citées, c'est-à-dire, l'acidité (et l'aluminium), les sels, la sécheresse. Il faudrait aussi tenir compte des pertes en sols qui en résultent ainsi que de la salinisation secondaire (400 millions d'hectares), de l'érosion à l'échelle du globe, et de la pollution dans les régions nord. Les sols doivent être dorénavant considérés comme une ressource non renouvelable à protéger dans le mesure où il faut au moins de 1 000 à 10 000 ans pour former un sol qui peut être entraîné en quelques jours par l'érosion. A cette décroissance générale des ressources en sol vient s'ajouter un plafonnement, voire une diminution prévue des rendements dans la plupart des régions du globe. Or, on doit confronter ces données à la croissance continue de la population du globe (6 milliards en l'an 2000 ?).

Évidemment, l'état des réserves en sols cultivables ne se pose pas de la même manière au nord et au sud, et il en est de même pour la nature des problèmes posés actuellement.

Références

64. Godin P. Les sources de pollution des sols : essai de quantification des risques dus aux éléments traces. *Science du Sol* 1983 ; 73-87.
65. Adriano DC. Trace elements in the terrestrial environment. Springer Verlag, 1986 ; 533 p.
66. De Ploey J. La conservation des sols. *Supplément Agronomie La Recherche* 1990 ; 227 : 38-41.
67. Le Bissonnais Y. Comportement d'agrégats terreux soumis à l'action de l'eau : analyse des mécanismes de désagrégation. *Agronomie* 1988 ; 8 : 87-93.
68. Le Souder C, Le Bissonnais Y, Robert M. Influence of a mineral conditioner on the mechanisms of desaggregation and sealing of a soil surface. *Soil Science* 1991 ; 152 : 395-402.
69. Keeney DR. Sustainable agriculture : concepts and practices in the United States. *Conference on Agriculture-Environment-Quality*, Nancy (France), septembre 1991.
70. Keeney DR. Sustainable agriculture : definition and concepts. *J Prod Agric* 1990 ; 3 : 281-5.
71. Pédro G. Les grandes tendances des sols mondiaux. *Cultivar « Sols et sous-sols »*, 1984 ; 68-81.
72. Buringh P. Potential of world soils for agricultural production. In : *Managing soil resources*. Plenary session papers, 12th Int Cong of Soil Science, New Delhi, 1982 ; 33-41.
73. Kanwar JS. Managing soil resources to meet the challenge to mankind : Presidential address. In : *Managing soil resources*. Plenary session papers. 12th Int Cong of Soil Science New Delhi, 1982 : 1-32.
74. Dudal R. Land degradation in a world perspective. *J Soil Water Conserv* 1982 ; 37 : 245-9.
75. Robert M, Chenu C. Interactions between soil minerals and microorganisms. *Soil Biochemistry* 1991, 7 : 307-404. In : G Stotzky, JM Bollag.
76. Papy F, Boiffin J. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. II. Evaluation des possibilités de maîtrise du phénomène dans les exploitations agricoles. *Agronomie* 1988 ; 8 : 29-38.
77. Parr JF, Stewart BA, Hornick SB, Singh RP. Improving the sustainability of dryland farming system : a global perspective. *Adv In Soil Sci* 1990 ; 13 : 1-8.
78. Rodhe H. Acidification in a global perspective. *Ambio* 1989 ; 18 : 155-60.
79. Galloway JN. Atmospheric acidification : projections for the future. *Ambio* 1989 ; 18 : 161-6.
80. Travis CC, Hester ST. Global chemical pollution. *Environ Sci Technol* 1991 ; 25 : 814-8.
81. Sebillotte M, Meynard JM. Systèmes de culture, systèmes d'élevage et pollutions azotées, p. 289-312. In : *Nitrates Agriculture Eau*, Int Symposium, Paris La Défense, novembre 1990 ; ed. R. Calvet, INRA Paris.
82. Cheverry C, Fournier F, Hénin S. Criteria for observing and measuring changes associated with land transformations. In : MG Wolman, FGA Fournier. *Land transformation in Agriculture*. SCOPE publ John Wiley and Sons LTD, 1987 : 249-75.
83. Ruellan A. Soil vertical and lateral differentiation. In : *Soil Management under humid conditions in Asia*. IBSRAM, 1987 ; 5 : 155-68.
84. Van Diepen CA, Van Keulen H, Wolf S, Berkhout JAA. Land evaluation : from intuition to quantification. *Adv In Soil Sci* 1991 ; 15 : 139-204.
85. Lavelle P. The soil system in the humid tropics. *Biology International*, 1984 ; 9, 2-17.
86. Eschenbrenner V. Contribution des termites à la micro-agrégation des sols tropicaux. *Cah ORSTOM, sér Pédol* 1986 ; XXII (4) : 397-408.

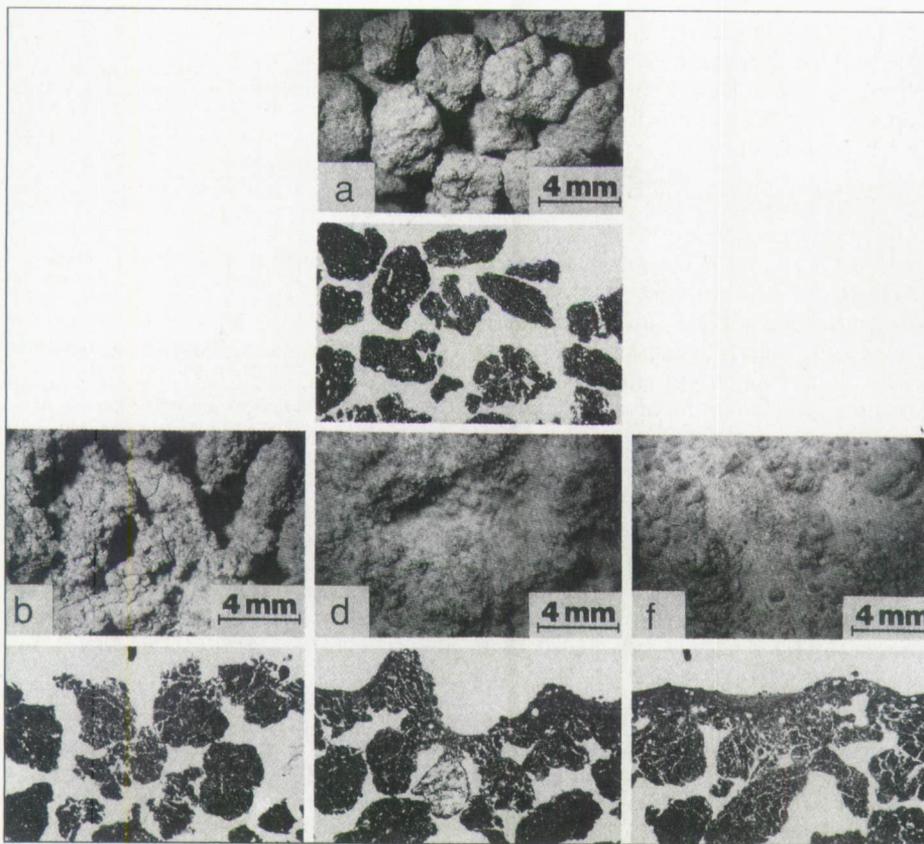


Photo 3. Formation d'une croûte sous l'effet d'une pluie simulée (intensité : 20 mm/h) : a) agrégats initiaux ; b, d, f) même échantillon après 3, 10 et 17 mm de pluie montrant les différents stades de la formation d'une croûte imperméable [68].

Photo 3. Crust formation (sealing of the surface) under simulated rain (intensity : 20 mm/h) : a) initial aggregates ; b, d, f) same sample after 3, 10 and 17 mm of rain showing the different steps of formation of an impermeable crust [68].

Au nord du globe, l'augmentation de productivité des cultures s'est faite durant les vingt dernières années par la spécialisation des cultures, l'augmentation corrélative de la fertilisation, des pesticides, et de la mécanisation... Cela a conduit à une dégradation progressive de la structure des sols que l'on peut imputer en partie aux faibles retours en matière organique (donc conduisant à une diminution du taux de matière organique), à la diminution de la vie biologique qui joue un rôle majeur dans l'agrégation [75] et évidemment, aux effets directs des pratiques agricoles par l'effet de compaction. La répercussion de cette dégradation peut être directe sur les phénomènes d'érosion dans les zones limoneuses de grande culture [76]. La dégradation chimique intervient par l'apport des nitrates, pesticides et métaux lourds et les conséquences se retrouvent sur la qualité des eaux des nappes, des rivières ou des zones littorales. Mais il ne faut pas à ce

niveau se tromper de priorité : c'est le sol qui détermine la qualité de l'eau et c'est lui qu'il faut protéger.

Dans toutes ces régions nord, la préoccupation actuelle des agronomes est d'instaurer une agriculture durable (*sustainable agriculture*) qui, dans sa définition la plus générale serait capable d'être productive, donc viable pour les agriculteurs, et de conserver les ressources (en particulier en sols et en eau), de protéger l'environnement (*figure 8*, [77]) ; un autre objectif est évidemment d'avoir une agriculture qui ne soit pas dangereuse pour la santé.

Dans les régions sud du globe, nous avons vu que les problèmes les plus importants proviennent de contraintes chimiques et physiques qui limitent la production : contraintes chimiques (phytotoxicité aluminique, faible fertilité chimique, présence de sels) ou contraintes physiques (dégradation des horizons de surface, pour des causes très variées, faibles réserves en eau...).

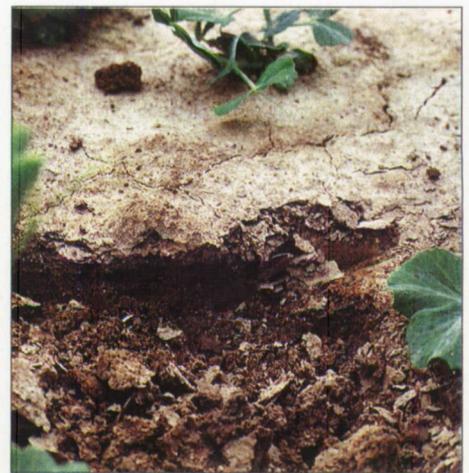


Photo 4. Développement de l'érosion (Champagne).

Photo 4. Progress of erosion (Champagne, France).



Photo 5. Formation d'une couche de battance (Champagne). (Cliché M. Robert).

Photo 5. Formation of a crusting layer (Champagne, France).

Il apparaît depuis déjà un certain nombre d'années que les méthodes utilisées au nord ne sont pas transposables au sud et ne doivent pas l'être. On y a déjà expérimenté une agriculture à faibles intrants et respectant le sol qui n'est pas éloignée de l'agriculture durable [2, 29]. Il y a donc pour des raisons différentes, une évolution similaire au nord comme au sud pour promouvoir une

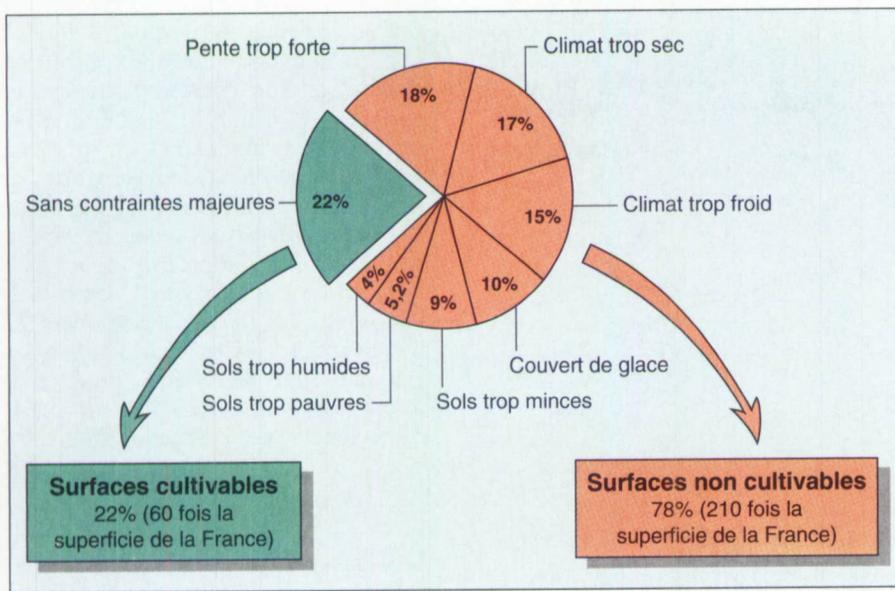


Figure 7. Ressources mondiales en sols. Surfaces cultivables et différentes contraintes [71].

Figure 7. World soil resources. Arable soils and various constraints [71].

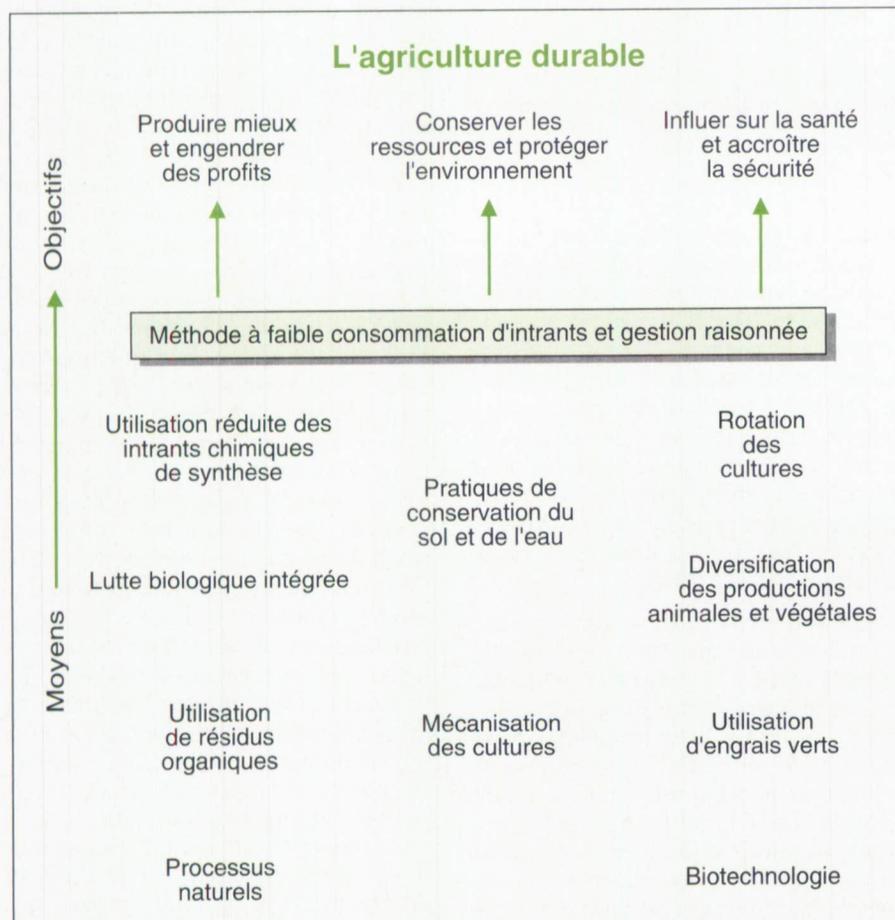


Figure 8. Concept d'agriculture durable (*sustainable*) tel qu'il est présenté actuellement aux Etats-Unis avec les objectifs et les moyens à mettre en œuvre (intrants, gestion et pratiques) [77].

Figure 8. A current concept of sustainable agriculture in the United States showing the objectives and the means of achieving them through low-input methods and skilled management [77].

agriculture durable à faibles intrants. L'opposition que nous avons faite entre nord et sud reflète donc beaucoup plus une sensibilité actuelle différente aux problèmes prioritaires : développement et alimentation au sud, environnement au nord. En réalité, des problèmes d'environnement analogues se posent actuellement au sud et ils peuvent prendre des proportions encore plus catastrophiques au sud qu'au nord à cause de l'absence fréquente de réglementation stricte.

Nous avons dit que de nombreux phénomènes se posent à l'échelle du globe et nous avons déjà cité les conséquences de l'intensification des rizières sur l'effet de serre ou le « trou d'ozone » ; il en est évidemment de même avec le bilan des déforestations incluant le carbone du sol. La pollution atmosphérique et les pluies acides se développent, conséquence de l'industrialisation accélérée de l'Asie [78, 79], et évidemment les sols tropicaux désaturés seront des zones où les conséquences sur la végétation et la culture pourront être très graves (figure 9).

Les excès de fertilisants et de pesticides et la pollution des eaux qui en découle, peuvent intervenir très vite, en particulier dans les cultures irriguées et la riziculture. Les traitements fongicides sur le café, le coton ou d'autres cultures tropicales apportent elles-aussi, de fortes pollutions en composés organiques toxiques ou en métaux lourds (Cu, As...) [65]. Les déchets industriels et surtout urbains sont là aussi, un problème essentiel en relation avec le développement des grandes métropoles du sud (Mexico, São Paulo, Rio de Janeiro, Le Caire...). L'épuration des eaux est également un problème qui intéresse le nord comme le sud.

On pourrait citer de nombreux exemples qui montrent que les phénomènes de pollution chimique se posent à l'échelle du globe lorsque l'on retrouve par exemple le mercure dans les poissons des lacs, le plomb dans les neiges, la dioxine ou les pesticides dans les glaces de l'Arctique [80].

Les moyens à mettre en œuvre, au nord comme au sud, impliquent des conceptions agronomiques nouvelles : agriculture durable à faibles intrants agriculture intégrée [81, 82] ou « *organic farming* » préconisée dans les régions nord, mais qui a certainement encore plus de justifications au sud. Ces con-

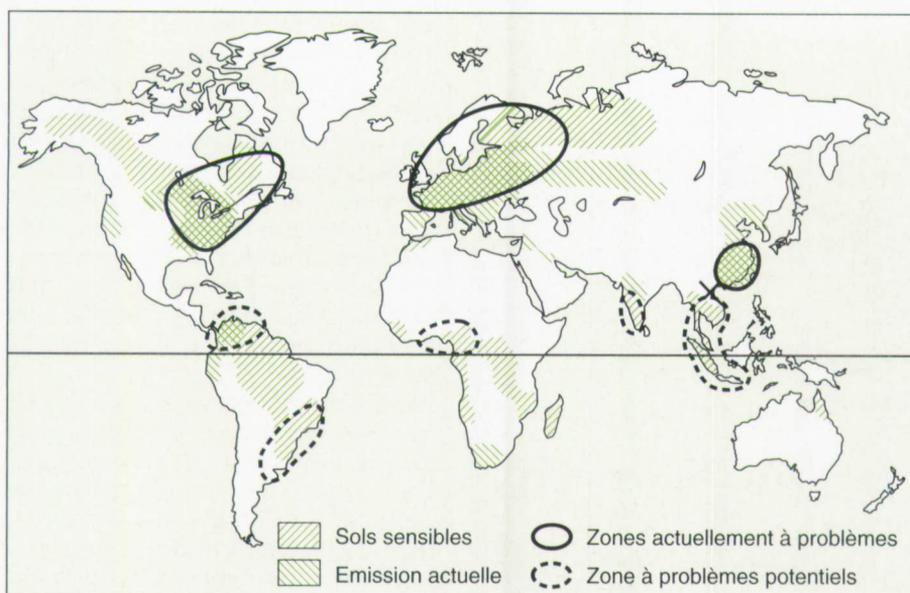


Figure 9. Représentation schématique des estimations [78] concernant :
 a) la sensibilité des sols à une acidification par des dépôts ou pluies acides ;
 b) l'émission actuelle de composés acides. Les parties entourées en trait plein représentent la combinaison de a et b et donc des zones à problèmes. Les parties entourées en pointillé représentent une combinaison de sols sensibles avec les émissions futures. Ce sont donc les zones qui poseront des problèmes à l'avenir.

Figure 9. Rough estimates [78] of :
 a) sensitivity of soils to surface-water acidification due to acid deposition ;
 b) present emission of acidifying compounds. Areas encircled by solid lines represent a combination of a and b and are thus problem areas today. Areas encircled by dashed lines represent a combination of sensitive soils and regions with projected rapid increases in emissions. Such areas are potential future problem areas.

ceptions agronomiques sont beaucoup plus difficiles à mettre en œuvre qu'une agriculture intensive. Il est en particulier nécessaire de beaucoup mieux adapter les systèmes de culture aux potentialités agroclimatiques et socioéconomiques. L'approche devra être beaucoup plus interdisciplinaire : en particulier pour les problèmes d'environnement ; on devra chercher une meilleure gestion des paysages et une meilleure adaptation des pratiques et des cultures aux conditions du milieu. De même, on doit concevoir une plus grande intervention de la génétique pour promouvoir des plantes mieux adaptées aux contraintes (résistance à l'acidité, aux sels, à la sécheresse), mais aussi aux maladies, et une meilleure utilisation des progrès biotechnologiques (utilisation des bactéries, mycorhizes...), aussi bien pour économiser les intrants que pour développer la lutte biologique...

Mais il importe aussi de changer d'attitude vis-à-vis du sol. En effet, celui-ci a souvent dans le passé été utilisé comme un simple support pour la culture ou un simple filtre pour l'environnement conditionnant la qualité de

l'eau. En réalité, il s'agit d'un milieu organisé à différentes échelles, depuis le bassin versant jusqu'aux agrégats les plus élémentaires [83] ; ceux-ci pouvant souvent, comme nous l'avons vu, déterminer des phénomènes à d'autres échelles (érosion). Les classifications, les systèmes de cartographie et d'évaluation des terres (USDA ou FAO) doivent être adaptés pour mieux prendre en compte ces organisations et les aspects concernant la fertilité chimique et surtout physique des sols [84].

Le sol doit être enfin considéré comme un milieu vivant et il importe de mieux gérer la matière organique et de mieux utiliser les êtres vivants qui s'y développent. On doit utiliser les plantes pour recouvrir le sol, fixer l'azote mais aussi pour restructurer le sol. On doit mieux gérer la faune du sol (vers de terre, termites, fourmis) qui a une très grande importance sur la structure des sols et même l'introduire quand elle est absente [85, 86]. En revanche, l'introduction des microorganismes dans les sols va se trouver limitée par les lacunes qui existent actuellement dans les connaissances sur l'écologie du sol [75].

Comme on peut le constater, l'agriculture, au cours de son évolution récente durant les trente dernières années, a eu tendance à s'affranchir des limitations du milieu, en particulier du sol, pour obtenir les productions maximales, avec des plantes performantes et beaucoup d'intrants. A l'heure actuelle, la nature ne fait que se rappeler à nous, et il importe de mieux gérer la diversité et les contraintes de l'environnement en respectant les cycles biogéochimiques. Les nouveaux problèmes posés à la Science du Sol ouvrent tout un champ de recherche pour l'avenir. ■

Résumé

Cet article fait le point sur l'importance du sol aussi bien pour la production agricole que pour l'environnement. Le premier aspect étant prépondérant dans les pays en voie de développement pour une question de subsistance alimentaire. La première partie de l'article énumère les principales contraintes qui font s'amenuiser la ressource en sols cultivables sous l'effet de processus de dégradation physique : compaction liée à la déforestation, érosion, salinisation liée à l'irrigation, difficultés de gestion de l'eau. La fertilité chimique (manque de réserves en éléments nutritifs et surtout phytotoxicité liée à l'acidité) est également une contrainte majeure. Cette évolution peut conduire à une dégradation biologique des sols et à la désertification. La deuxième partie considère le sol comme une interface dans l'environnement sur lequel s'exerce une action polluante croissante d'origine anthropique. Sont traités successivement : les échanges sol-atmosphère, les pesticides, les nitrates, les métaux lourds, le sol épurateur biologique et la dégradation par érosion. Tous ces problèmes d'environnement, déjà cruciaux pour les régions nord du globe, concernent encore davantage les régions sud. Il est donc essentiel, pour l'avenir, d'obtenir, au sud comme au nord une production agricole durable en sauvegardant le sol (ressource non renouvelable et limitée) et en protégeant l'environnement.