

Sols et agriculture : ressource en sol, qualité et processus de dégradation

Une prospective mondiale, européenne et française

Michel Robert, Pierre Stengel

Le Révérend T.R. Malthus en 1798 prévoyait une croissance géométrique pour la population et arithmétique pour les ressources. Même si ces prévisions ne sont pas vérifiées, on doit se poser un certain nombre de questions à propos du XXI^e siècle [1].

La population mondiale, selon les prévisions, oscillera entre 9 et 11 milliards d'habitants, les ressources naturelles comme l'eau et les sols seront limitées et leur part dévolue à l'agriculture décroîtra forcément sous l'effet de pressions diverses. La question de la fourniture alimentaire mondiale va donc se poser en priorité.

De nombreuses et récentes publications se sont penchées sur la raréfaction de la ressource en eau [2, 3], mais ont relativement peu étudié la dégradation de la ressource en sols, ce à quoi se consacrera donc cette présentation aussi bien au niveau quantitatif que qualitatif en se référant aux relations spécifiques qui existent avec l'agriculture [4].

M. Robert : Service de la recherche et des affaires économiques, ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, 20, avenue de Ségur, 75007 Paris, France ; Unité des sciences du sol, INRA, Versailles, France.
P. Stengel : INRA, Domaine Saint-Paul, 84143 Montfavet, France.

Ressource en sols pour l'agriculture : évaluation des processus de dégradation

Il est maintenant bien connu que la ressource en sols est limitée en ce qui concerne leur première fonction qui est l'agriculture et la production de nourriture [5, 6].

Au niveau mondial

La surface des sols cultivables concerne environ 22 % des terres émergées (figure 1), soit environ 3,3 milliards d'hectares. Certaines catégories classées parmi les sols non cultivables pourraient être remises en question : l'irrigation ou le drainage peuvent en effet transformer des sols trop secs ou trop humides et l'on peut imaginer que des sols de la partie nord du globe, qui sont actuellement trop froids, pourront être cultivés dans le futur à la suite d'un accroissement de la température

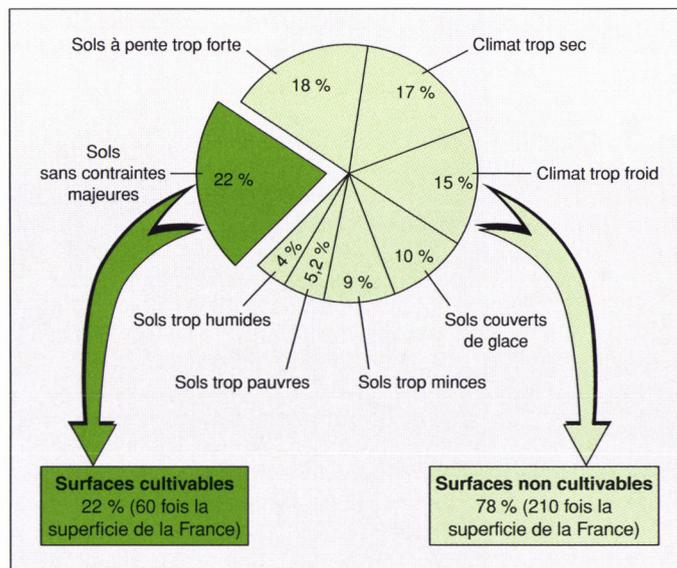


Figure 1. Les ressources mondiales en sols (d'après Pedro [5]).

Figure 1. World soil resources.

Summary

Soils and agriculture: soil resource, quality and degradation processes

M. Robert, P. Stengel

This paper concerns limitations in world soil resources and major soil degradation processes. Physical (erosion-compaction) and chemical (acidity) processes are mainly responsible for degradation, but in developed countries phenomena related to agricultural intensification have upset environmental soil functions and other environmental components (water, air, etc.). In terms of global food security, it is predicted that in developing countries with the highest population growth, increased agricultural production will lead to both quantitative (water-soils) and qualitative (environmental constraints) limitations. In addition, predicted climatic changes will likely worsen the situation and new biotechnological advances will not compensate for these negative impacts. It is essential to have access to better indicators to be able to efficiently monitor soil and ecosystem quality, thus protecting world soil resources and facilitating their sustainable management.

Cahiers Agricultures 1999 ; 8 : 301-8.

continent africain) et, d'autre part, parce que le chaulage des sols tropicaux caractérisés par la présence de minéraux argileux à charges variables (kaolinite, oxyhydroxydes de fer et d'aluminium) provoque des effets complexes et difficiles à maîtriser.

À cette limitation de la réserve en sols et aux contraintes naturelles qui s'exercent sur eux, il faut rajouter l'effet de différents processus de dégradation de nature physique, chimique ou biologique (figure 3) [9] que l'on rencontre au niveau mondial (tableau 1) [10].

Parmi les processus physiques, la sécheresse est plus une contrainte naturelle qu'une dégradation. Le processus de désertification qui intervient majoritairement dans les zones arides et semi-arides implique à la fois la végétation (raréfaction du couvert végétal) et l'évolution des sols.

Le processus de dégradation le plus important et le plus généralisé (tableau 1) est sans doute l'érosion par l'eau dans la mesure où elle touche 790 millions d'hectares répartis sur tout le globe. Les causes qui la favorisent sont le surpâturage, la déforestation et une mauvaise utilisation des terres (mauvaise couverture du sol ou culture de terres en pente sans précautions). La compaction, quant à elle, succède le plus souvent à la déforestation ou résulte de la mécanisation excessive de l'agriculture.

Parmi les processus chimiques de dégradation, la salinisation peut concerner près de 1 milliard d'hectares, souvent impropres à la culture mais qui pourraient éventuellement, à l'avenir, être mieux utilisés pour des cultures à vocation énergétiques de faible rendement. Une partie de ce processus résulte d'une salinisation secondaire consécutive à l'irrigation. Très souvent, l'irrigation réalisée dans des régions où l'évapotranspiration est grande conduit à l'accumulation des sels et, donc, à la dégradation des sols avec des conséquences directes sur les propriétés physiques (destruction de la structure à la suite d'une dispersion).

Les problèmes de la pollution chimique des sols et des eaux provoquée par l'agriculture intensive, qui prennent de l'ampleur en Europe, ne font qu'émerger dans les pays du Sud. Ainsi, à l'irrigation et à la révolution verte a été associée une augmentation des intrants (fertilisants et pesticides), et la pollution des sols et de l'eau commence à se manifester : la catastrophe du lac d'Aral en est une illustration.

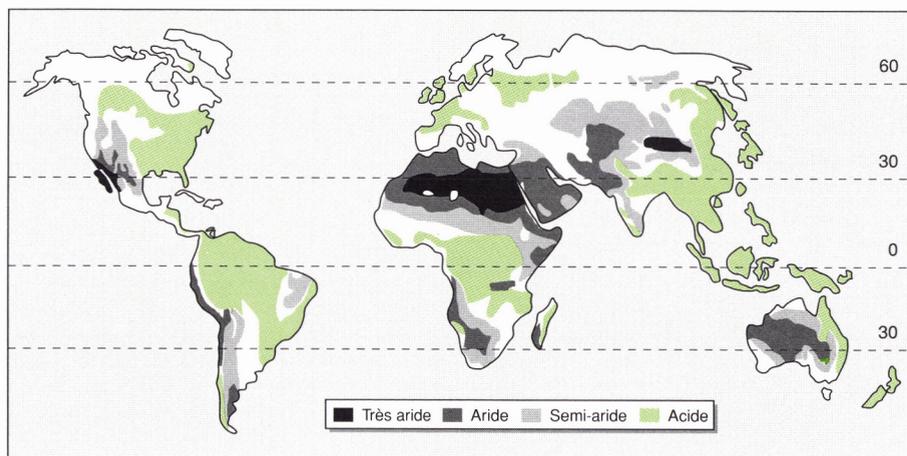


Figure 2. Répartition mondiale des zones acides et des zones arides.

Figure 2. Global distribution of arid and acid zones.

lié au changement climatique. Seule la moitié de cette ressource en sols cultivables est actuellement mise en valeur et il faudrait en analyser les raisons plus en détail.

On peut déjà affirmer qu'au moins dans la partie sud du globe, les sols sont soumis à l'une ou l'autre des deux contraintes naturelles majeures que sont l'aridité (et la sécheresse qui en résulte) et l'acidité liée à leur intense altération (figure 2).

Dans les zones arides, l'irrigation peut permettre la culture (c'est le cas dans plusieurs pays du Maghreb ou du Moyen-Orient), mais on sait que la ressource en eau est limitée et que la part

réservée à l'agriculture sera de plus en plus réduite au XXI^e siècle [7].

L'acidité et sa résultante concrète, la toxicité aluminique, est l'autre contrainte la plus généralisée au niveau mondial [8]. On connaît non seulement son effet direct sur le rendement des cultures mais aussi le moyen le plus efficace pour y remédier, le chaulage, qui est généralisé dans les régions du nord du globe. Ce moyen pourrait peut-être permettre la mise en valeur de millions d'hectares de sols arides au Cerrado, dans le nord-est du Brésil. Ce procédé est hélas difficilement généralisable au sud, d'une part parce que les amendements calcaires peuvent ne pas être présents (exemple du

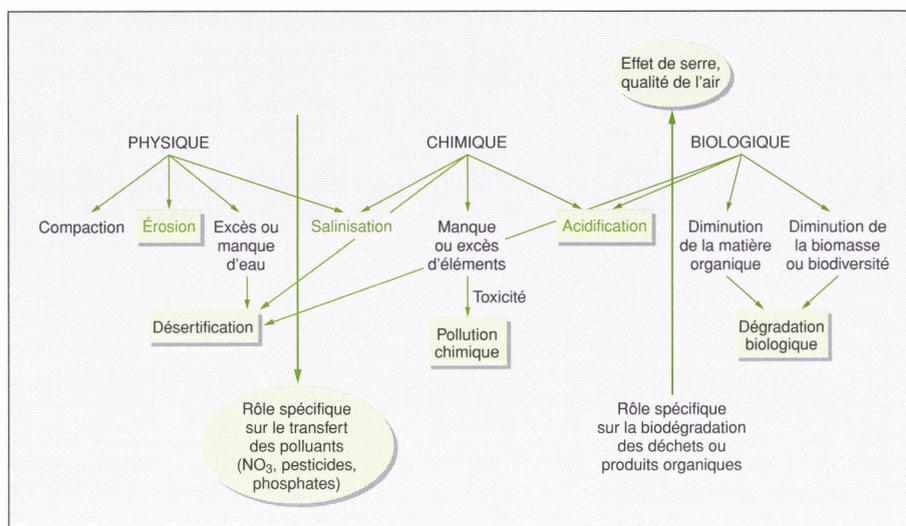


Figure 3. Les différents types de dégradation des sols.

Figure 3. Different types of soil degradation.

La dégradation biologique des sols n'est jamais recensée dans la mesure où elle est plus difficile à définir et parce que les critères d'évaluation de la qualité biologique font cruellement défaut à l'heure actuelle. Elle apparaît le plus souvent comme une conséquence des autres processus de dégradation.

Un appauvrissement de la biodiversité accompagne une diminution de la teneur en matière organique des sols de culture, phénomène qui, lui aussi, est mondial. Cet appauvrissement et la réduction de l'activité biologique qui en résulte sont les causes probables de l'accroissement des phénomènes d'érosion et de désertification.

Tableau 1

Dégradation des sols à l'échelle mondiale et principales causes (surface, en millions ha, affectée par les 4 principaux processus)

| Région | Érosion hydrique | Érosion éolienne | Dégradation chimique | Dégradation physique | Total (millions d'ha) |
|--|------------------|------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| Afrique (millions d'ha) | 170 | 98 | 36 | 17 | 321 |
| Asie (millions d'ha) | 315 | 90 | 41 | 6 | 452 |
| Amérique du Sud (millions d'ha) | 77 | 16 | 44 | 1 | 138 |
| Amérique du Nord et centrale (millions d'ha) | 90 | 37 | 7 | 5 | 139 |
| Europe (millions d'ha) | 93 | 39 | 18 | 8 | 158 |
| Australie (millions d'ha) | 3 | | 1 | 2 | 6 |
| Total (millions d'ha) | 748 | 280 | 147 | 39 | 1 214 |
| Causes principales | | | | | |
| Déforestation (% et millions d'ha) | 43 | 8 | 26 | 2 | 384 |
| Surpâturage (% et millions d'ha) | 29 | 60 | 6 | 16 | 398 |
| Mauvaise gestion (% et millions d'ha) | 24 | 16 | 58 | 80 | 339 |
| Autres (% et millions d'ha) | 4 | 16 | 12 | 2 | 93 |
| Total (% et millions d'ha) | 100 | 100 | 100 | 100 | 1 214 |

Soil degradation worldwide and the main causes (area, in Mha) relative to the four main degradation processes

Des études récentes [11] ont été menées avec des méthodologies issues de la biologie moléculaire pour caractériser la biodiversité microbienne. Elles ont abouti à montrer que, selon ces critères, la biodiversité des sols de culture « ordinaires », c'est-à-dire recevant beaucoup d'intrants (en particulier de pesticides), serait aussi faible que celle des sols très pollués par l'industrie.

L'évaluation totale des pertes en sol par ces processus de dégradation est difficile à faire car, souvent, telle l'érosion, elles n'affectent que la surface du sol qui se reconstitue par la base. De plus, les dégradations peuvent être réversibles dans certaines conditions (par exemple, la désertification liée à la sécheresse, la salinisation...). On estime cependant que le capital sol est actuellement amputé de 12 à 16 millions d'hectares par an.

À l'échelle européenne

Dans une première approche (tableau 2), on retrouve bien, dans une évaluation réalisée par Oldeman en 1994 [12], les processus classiques de dégradation évoqués au niveau mondial. L'érosion et l'acidification sont prépondérants, la compaction mériterait d'être mieux évaluée.

On doit prendre en compte la pollution chimique localisée liée à l'industrie (ce qui n'a pas été fait dans le tableau 2) et qui touche, selon la Commission européenne, plus de 300 000 sites. L'extension spatiale englobant les pollutions de proximité (par voie atmosphérique ou aquatique) ou les déchets devrait être mieux précisée en particulier vis-à-vis des zones agricoles ou horticoles mais, de toute manière, les coûts engendrés par cette pollution des sols et par la dépollution éventuelle sont considérables.

De même, l'urbanisation et l'imperméabilisation par les constructions variées (infrastructures...) entraînent une perte en sols irréversible qui doit être prise en compte dans la mesure où il s'agit d'un processus en pleine expansion.

En Europe, on estime les pertes à 100 000 hectares par an, toutes causes confondues.

À l'échelle de la France

Le tableau 3, bien qu'incomplet ou fournissant des données approchées, permet d'évaluer les processus de dégradation des sols en France.

La contrainte majeure est constituée par l'acidification puisque 30 % des sols sont

Tableau 2**Processus de dégradation des sols en Europe : évaluation des surfaces (d'après Oldeman *et al.* [10])**

| Dégradation | Surface (millions d'ha) | % surface totale |
|----------------------------|-------------------------|------------------|
| Érosion hydrique | 115,0 | 12,0 |
| Érosion éolienne | 42,0 | 4,0 |
| Acidification | 85,0 | 9,0 |
| Pesticides | 180,0 | 19,0 |
| Nitrates et phosphates | 170,0 | 18,0 |
| Compaction | 33,0 | 4 |
| Perte de matière organique | 3,2 | 0,3 |
| Salinisation | 3,8 | 0,4 |
| Hydromorphie | 0,8 | 0,1 |

Soil degradation in Europe : an assessment of the area affected**Tableau 3****Évaluation des processus de dégradations des sols et de l'environnement* en France**

| Dégradation | Surface (millions ha) | % surface totale* |
|---------------------------|-----------------------|-------------------|
| Physique : | | |
| - érosion (hydrique) | 5 | 10 |
| - compaction | ? Pas d'évaluation | |
| Chimique : | | |
| - acidité | 15,0-20,0 | 30 |
| - pollution concentration | 0,2 | |
| - proximité sols de vigne | 1,0 | |
| - salinisation | 0,3 | 20 |
| Biologique | | |
| Pas d'évaluation | | |
| Excès de pesticides | 5 à 10 | > 10 |
| Excès de nitrates | 15 à 20 | 30 |
| Émission de gaz : | | |
| - NH ₃ | ? | |
| - N ₂ O | ? | |
| Urbanisation | 5,0-6,0 | 10 |

* Surface totale = 55 millions ha (35 pour agriculture et 15 pour la forêt).

Assessment of soil degradation processes in France and those which affect the whole environment

acides et 30 % sont désaturés (en cours d'acidification) [13]. Elle est aisément levée par le chaulage pour les sols cultivés. Dans le cas des sols des forêts, le pH a baissé d'une unité au cours des dernières années sous l'influence prédominante des pluies acides et atteint souvent une valeur critique (entre 3 et 4) qui

amène à considérer le principe du chaulage en forêt.

L'érosion est, par ordre d'importance, le second processus de dégradation avec environ 5 millions d'hectares concernés. Des études récentes [14] ont montré que, pour la moitié de cette surface, elle est liée à la pente ou à des cultures spécifiques (vignobles, vergers...) et se pro-

duit dans le sud de la France, au climat méditerranéen. Un second type d'érosion, mis en évidence récemment, est lié à l'instabilité structurale du sol et à des pratiques agricoles qui permettent la formation d'une croûte de battance.

Parmi les processus cités, certains sont réversibles ou, tout au moins, en ce qui concerne l'acidification, peuvent être traités. D'autres sont irréversibles et en perpétuelle expansion, comme les pertes liées à la construction. Dans le cas de l'érosion, les surfaces recensées correspondent à un aléa potentiel qui peut être combattu par les pratiques culturales (couverture du sol...) ou l'aménagement. Toutefois, les répercussions de ce dernier processus sont importantes, notamment celles, indirectes, sur la qualité de l'eau, les crues et inondations.

Au niveau européen, l'évaluation du coût de l'érosion est de 280 millions d'euros par an.

L'Europe et la France ont été délibérément choisies car elles sont représentatives des problèmes propres aux régions développées (nord du globe), l'extension de ces derniers au continent nord-américain étant toutefois possible [15].

Fonctions environnementales des sols et dégradation par l'agriculture

Fonctions du sol

Le sol a de nombreuses fonctions [16], la principale, depuis la naissance de l'humanité, ayant été de nourrir les hommes. Il s'agit donc d'une fonction axée vers la production agricole. En ce sens, le sol est d'abord un support de culture devant fournir aux plantes de l'eau, de l'air et des éléments nutritifs, tous nécessaires à une bonne fertilité physique, chimique et biologique (figure 4). Pour améliorer cette fertilité, l'agriculture a utilisé la fertilisation, les pesticides, le labour, le drainage et l'irrigation. Souvent, la fertilité biologique du sol a été négligée, que ce soit au travers de la non-reconstitution des stocks de matière organique ou par des actions

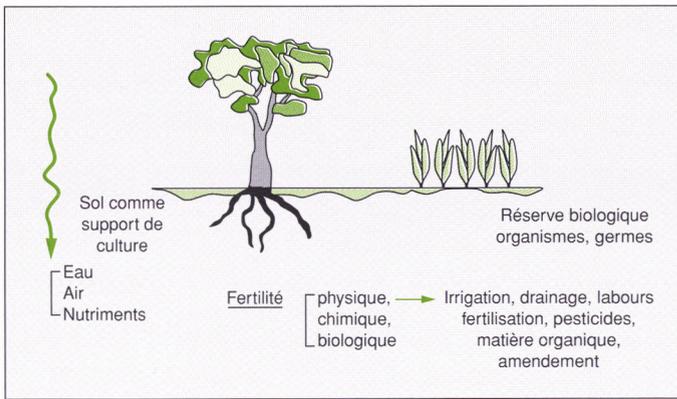


Figure 4. Sol et production alimentaire (agriculture).

Figure 4. Soil and food production (agriculture).

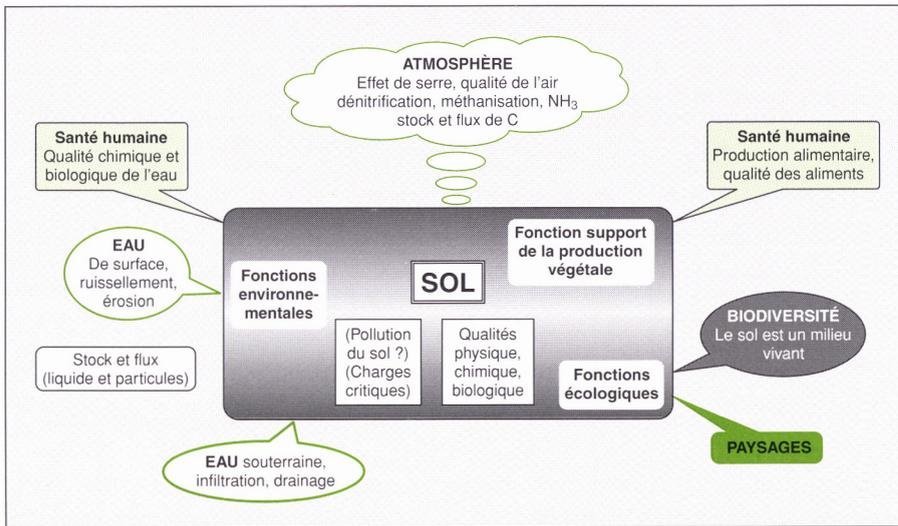


Figure 5. Fonctions environnementales du sol.

Figure 5. Environmental functions of soils.

négligées sur la biodiversité et les auxiliaires biologiques (faune du sol...).

Cette conception restrictive des fonctions du sol s'est exprimée par l'amplification de l'agriculture intensive durant les 50 dernières années, qui a provoqué non seulement une accélération des processus de dégradation des sols mais aussi une baisse de la qualité des principales composantes de l'écosystème : eau, air, biodiversité, paysages.

Depuis un certain nombre d'années, de nouvelles conceptions du sol, plus écologiques qu'avant, ont vu le jour ; le sol y est considéré comme une interface dans l'écosystème [16] et il lui est conféré d'importantes fonctions environnementales (figure 5). Elles donnent lieu, en France, à des recherches spécifiques lan-

cées par le ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement.

D'abord, vis-à-vis de l'air, le sol exerce ainsi une fonction de tampon des pluies acides ou des autres actions anthropiques analogues (fertilisation à base de NH_4), mais les limites à cette fonction existent et sont définies au travers des charges critiques d'acidité. Le sol remplit aussi un rôle majeur dans la séquestration du gaz carbonique de l'atmosphère au sein des stocks de matière organique. Il émet également un certain nombre de gaz à effet de serre (N_2O , CH_4).

Ensuite, vis-à-vis de l'eau, le sol exerce un rôle de filtre et de réacteur chimique et biologique pour les nitrates, phosphates, pesticides, et une fonction de

protection de sa qualité, qu'il s'agisse des eaux superficielles ou de nappe.

Puis, le sol « piège » et accumule les polluants minéraux ou, au contraire, assure une certaine biodégradation (bioremédiation) des déchets et des polluants organiques. Il remplit ainsi une fonction épuratrice dans l'écosystème qui a ses limites car si elle n'est pas totale, la pollution du sol peut être définitive.

Enfin, le sol exerce d'importantes fonctions écologiques vis-à-vis de la biodiversité (réservoir d'organismes et de gènes), des paysages ou des terroirs.

Le sol est donc le maillon central des cycles et tout déséquilibre ou pollution peut avoir des conséquences sur les différentes composantes de l'écosystème. La surfertilisation conduit, par exemple, à la fuite de nitrates dans les eaux ou à l'émission de N_2O dans l'atmosphère.

Dans un tel système, la santé humaine est dépendante de la qualité des sols par voie directe (ingestion des particules du sol) et, surtout, indirecte : eau, chaîne alimentaire.

Impact de l'agriculture sur la dégradation du sol et de l'écosystème

Durant les 50 dernières années, une série de problèmes environnementaux ont surgi en relation avec l'intensification de l'agriculture [17].

L'usage trop intensif des fertilisants à base de NH_4 et la volatilisation de NH_3 dans l'atmosphère en relation avec les épandages concernent la qualité de l'air et sont de nouvelles sources d'acidification et d'eutrophisation des écosystèmes terrestres (retombées azotées sur les sols forestiers).

Les excès liés à la fertilisation et aux épandages d'effluents d'élevage (lisiers...) ont conduit à la généralisation de l'eutrophisation des eaux des nappes superficielles et même des eaux littorales. L'accroissement de l'utilisation des pesticides a provoqué la formation de résidus liés dans les sols et des teneurs élevées dans les eaux de surface, de nappes ou littorales. Les surfaces concernées en Europe, en France et, d'une manière générale, dans les pays du Nord sont considérables et dépassent celles mises en cause par les processus classiques (tableaux 2 et 3). Il s'agit là de processus de dégradation de la qualité environnementale qui mettent en cause le « sol interface ».

L'agriculture intensive, conduite généralement sans apport d'amendements organiques, a entraîné un abaissement général du contenu en matière organique des sols en liaison avec une minéralisation du carbone ainsi que la production de gaz carbonique. On estime qu'au niveau mondial, depuis le début du siècle, près de 60 gigatonnes de carbone ont été émises (sous forme de gaz carbonique) dans l'atmosphère par l'agriculture. En ce qui concerne les sols, ceux des grandes cultures ont souvent atteint des teneurs très basses en matières organiques (entre 1 et 2 %) et les conséquences s'en font sentir, d'une part, sur l'agrégation, la stabilité de la structure et la sensibilité à l'érosion et, d'autre part, sur la biodiversité et la vie biologique.

Le sol fonctionne comme un système accumulateur vis-à-vis des éléments traces métalliques (ETM). Durant plus de 100 ans, il a ainsi accumulé les pollutions liées au développement industriel et agricole en protégeant les autres composants de l'écosystème (eau).

Nous n'évoquerons pas la pollution des sols liée aux retombées atmosphériques de proximité (fonderies...) ou diffuses, qui peuvent représenter plus de 50 % de la quantité totale reçue, ni celle que constituent les déchets d'origine industrielle ou urbaine répandus sur les sols.

Au niveau de l'agriculture, on peut considérer que tous les sols de vignoble du monde sont pollués par l'accumulation du cuivre provenant des traitements antifongiques dans l'horizon de surface (de 200 à 500 ppm). La fertilisation phosphatée (avec les apports de cadmium), les boues et composts de mauvaise qualité, l'épandage des effluents d'élevage (lisier, fumier avec cuivre et zinc) ont également participé à cet accroissement constant de la teneur en ETM des sols cultivés qui peut constituer une menace, une véritable bombe à retardement chimique [18], dans la mesure où des modifications du fonctionnement du sol (par exemple l'acidification) pourraient accroître la mobilité des éléments. De la même manière, une plus grande biodisponibilité peut entraîner un passage des éléments polluants dans les cultures et atteindre la chaîne alimentaire, avec les risques que cela comporte pour l'homme (c'est déjà le cas d'un certain nombre de sols de jardins urbains ou situés dans des zones industrielles).

Quelles solutions pour satisfaire les besoins alimentaires mondiaux ?

Même si le taux de natalité diminue ou est mieux contrôlé qu'avant, la population mondiale va continuer à croître significativement pour atteindre de 9 à 11 milliards d'habitants en 2050. On peut également considérer que cet accroissement se manifesterait uniquement dans les pays en développement, notamment en Asie (2 milliards d'habitants). L'Afrique aura toujours le taux de croissance le plus élevé (+ 0,44 %) et l'Europe le plus bas (- 0,02 %).

La disponibilité des terres et la production potentielle de nourriture doivent donc être considérées en relation avec les demandes futures. Sur les 3,3 milliards d'hectares de terres cultivables du monde, seul 1,5 milliard est effectivement mis en valeur et la majorité de la réserve (1,5 milliard) est bien située dans les régions du Sud. Cependant, des estimations récentes assez précises montrent qu'elle est en grande partie (1,1 milliard ha) située dans des zones humides et des forêts impropres à la culture ou, tout au moins, qu'il ne serait pas souhaitable de mettre en culture [1]. La répartition des autres surfaces disponibles pour la culture (500 millions ha) ne coïncide pas forcément avec les zones connaissant une croissance démographique, en particulier en Asie. De plus, il faut rappeler que ces terres sont souvent soumises à des contraintes importantes en matière d'acidité et de déficit en eau, et évidemment à tous les processus de dégradation déjà cités. Considérons les différentes solutions à cette pénurie programmée de la ressource en sols.

Intensification

L'intensification de la production peut encore jouer un rôle, en particulier dans certaines régions (Afrique) où l'on peut combler les carences en éléments nutritifs des sols [19]. Cela ne semble plus être le cas en Asie où la révolution verte, fondée sur l'utilisation de nouvelles variétés, la fertilisation et l'irrigation presque généralisée, a permis une forte augmentation de la production céréa-

lière. Actuellement, on assiste, d'une part, à une stagnation, voire à baisse des rendements et, d'autre part, à l'apparition d'effets pervers (dus à l'agriculture intensive) sur l'environnement qui vont limiter la production.

Irrigation

L'irrigation a été un important facteur d'intensification car elle a rendu possible l'agriculture en zone aride et a permis deux ou trois récoltes par an en Asie. Rappelons que 275 millions d'hectares irrigués (6 % de la surface agricole utile) donnent le 1/3 de la production mondiale et, plus particulièrement, 55 % du riz et du blé. Le Programme des Nations unies pour le développement (PNUD) compte sur l'irrigation pour satisfaire 50 % des besoins alimentaires des habitants supplémentaires d'ici au milieu du siècle prochain.

Sauf progrès technique très important, toutes les prévisions montrent pourtant qu'il y aura pénurie d'eau au XXI^e siècle. La part dévolue à chaque habitant du sud du globe devrait passer de 1 000 à 800 m³/an, la proportion consacrée à l'irrigation s'y réduisant plus que les autres. Le déficit sera particulièrement sensible en Afrique subsaharienne et en Asie où l'irrigation est le plus nécessaire. En même temps, d'importants problèmes environnementaux apparaissent [7] avec, déjà, la salinisation secondaire qui est une menace permanente faisant notablement régresser les surfaces irriguées. Mais des phénomènes beaucoup plus inquiétants, spécifiques des zones irriguées et menaçant la santé humaine (pollution par les nitrates, pesticides), sont à craindre. Rappelons la pollution par le cadmium au Japon avec concentration dans le riz [20], le sélénium qui menace en Californie et en Asie (notamment au Bengale et au Bangladesh) la mise en solution de l'arsenic par l'irrigation qui engendre une véritable catastrophe sanitaire avec empoisonnement lent par l'eau et l'alimentation et multiplication des cancers de la peau. Ainsi, des limitations à la fois quantitatives et qualitatives apparaissent au niveau des ressources en eau et en sols, qui viennent limiter les perspectives d'accroissement de la production.

Biotechnologies

Les progrès de la biologie moléculaire vont permettre des avancées notables

dans la connaissance de la microflore du sol où à peine 10 % des espèces sont connues. On peut ainsi espérer mieux maîtriser l'impact des pratiques et leurs effets sur la biodiversité microbienne et mieux utiliser les micro-organismes en agriculture ou pour la bioremédiation des sols dégradés. Une meilleure utilisation des fixateurs d'azote (rhizobium) peut aider à réduire la pollution par les nitrates.

Le développement de la mycorhization constitue peut-être une excellente solution pour l'utilisation par les plantes des éléments nutritifs ou leur adaptation aux sols acides.

Les plantes génétiquement modifiées ont été mises au point en priorité pour la résistance aux maladies ou aux pesticides dans les pays développés. Il serait sans doute plus important d'en trouver qui soient mieux adaptées aux contraintes majeures des sols, c'est-à-dire à l'acidité, à la sécheresse ou aux sels. Les premières sont des plantes exigeantes et adaptées à l'agriculture intensive, les secondes développent plutôt des stratégies de survie ou de subsistance, et les mécanismes mis en jeu (effets osmotiques pour la sécheresse et les sels, mécanisme de toxicité aluminique dans les sols acides) sont complexes. En dehors de toute considération éthique ou environnementale sur les organismes génétiquement modifiés (OGM), leur utilisation pour régler les problèmes essentiels des pays du Sud n'est pas encore probante et ne permettra sans doute pas de faire des miracles [21].

Émergence de nouveaux problèmes ou de nouvelles contraintes, climatiques ou environnementales

Changements climatiques

Les inquiétudes sont fortes quant à l'augmentation constante des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, à leur effet sur les modifications climatiques locales

et globales qu'ils provoqueront [22, 23]. Même si les prévisions sont difficiles à établir, les scénarios les plus probables à 50 ou 100 ans prévoient un déplacement général des pluies (avec augmentation) en direction des pôles et un climat plus sec avec une diminution de 10 à 20 % des précipitations dans la partie centrale du globe. Cela sera conjugué, en général, à une élévation de la température de 1 à 2 °C et, donc, à un accroissement de l'évapotranspiration. Ce phénomène touchera principalement l'Afrique subsaharienne, la façade ouest de tout le continent américain et la partie centrale de l'Asie. Il y aura un risque accru de sécheresse et de désertification. Si l'on considère déjà le nord et le sud de la Méditerranée, le déséquilibre, en ce qui concerne les réserves en eau et l'irrigation, sera encore plus marqué qu'aujourd'hui [7].

Si l'on considère maintenant l'élévation du niveau de la mer ainsi que le risque d'inondation et d'accroissement de l'influence saline, la partie sud du globe y sera plus sensible que la partie nord. Ainsi, on peut estimer que, vraisemblablement, les impacts des changements climatiques vont encore accentuer le déséquilibre nord-sud en ce qui concerne les ressources et la production alimentaire.

Contraintes environnementales

Les problèmes qui ont accompagné le développement de l'agriculture intensive au nord du globe sont déjà présents dans certains pays en développement, en particulier en Asie et dans les zones irriguées : eutrophisation, pollution par les pesticides et les éléments traces. Étant donné que la réglementation de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) concernant les pesticides (notamment les insecticides et, surtout, les organochlorés) est plus tolérante (facteur de 10 à 1 000) que la réglementation européenne, de réels problèmes se posent aussi bien pour la santé humaine que pour la faune sauvage, entre autres aux Philippines, en Inde, en Indonésie et au Sri Lanka [24].

On doit également rappeler que la révolution verte s'est traduite par une augmentation importante de la production de méthane dans l'atmosphère avec un effet significatif sur l'effet de serre. De même, les récentes crues catastrophiques en Chine sont en partie liées à l'érosion

et à la mauvaise gestion des sols limoneux des plateaux et des grandes plaines.

Il existe donc de fortes probabilités pour que de sérieux dommages environnementaux surviennent dans les pays en développement au cours des 50 prochaines années, qui seront à l'origine de contraintes environnementales considérables pour la production agricole.

La majorité des problèmes que nous avons évoqués pour les sols sont hérités soit du XIX^e siècle (par exemple la pollution industrielle), soit du XX^e siècle (l'agriculture). Il est difficile de prévoir l'émergence de nouvelles difficultés en ce qui concerne la dégradation des sols dans la mesure où elle prend en général de 50 à 100 ans. Indépendamment de la décroissance de la teneur en matière organique et de l'acidification des sols avec son cortège d'effets chimiques (toxicité aluminique, mobilité des éléments traces métalliques...), de nouveaux processus de dégradation pourraient concerner le fonctionnement biologique des sols, tels que l'accumulation de pathogènes nouveaux ou de gènes viables.

On sait aussi que la majorité des radionucléides (césium, strontium, uranium...) peuvent s'accumuler dans les premiers millimètres du sol et y subsister durant des siècles : après le premier impact direct de la contamination (globale, régionale ou locale), la persistance du risque est directement liée au sol.

Solutions ou recommandations

Comme on a pu le voir, la réserve en sols cultivables est limitée au niveau mondial et les nouvelles extensions devraient concerner soit des environnements fragiles, soit des sols soumis à des contraintes naturelles fortes. Des processus de dégradation viennent aussi diminuer le potentiel existant. Il va donc falloir trouver des solutions pour maintenir et même augmenter la production agricole afin de satisfaire les besoins alimentaires d'une population encore en expansion. Un compromis devra être trouvé entre une agriculture fortement productive et la bonne gestion des ressources naturelles pour empêcher une dégradation des sols et de l'environnement. On doit pour cela élaborer des systèmes de suivi de la qualité des sols et des méthodes de leur gestion durable.

Conclusion

En France, en Europe ou en Amérique du Nord, on assiste depuis quelques années à l'émergence de nouvelles formes d'agricultures respectueuses de l'environnement. Pour cela, la gestion de l'eau et des sols doit se faire à l'échelle du bassin versant. Cela implique de nouvelles pratiques, un meilleur recyclage des éléments nutritifs, des traitements contre les pathogènes mieux adaptés qu'actuellement, une couverture du sol réduisant l'érosion et le taux de nitrates [25].

Par ailleurs, à la suite des accords de Kyoto et de Buenos Aires, de nouvelles stratégies nationales et internationales sont mises au point pour lutter contre les gaz à effet de serre et le changement climatique. La séquestration du carbone dans les sols devient un phénomène important. Accorder une valeur économique aux pratiques agricoles qui accumulent du carbone pourrait encourager une meilleure gestion de la matière organique, facteur clé du fonctionnement du sol [26].

On a également besoin de nouveaux indicateurs de la qualité des sols et de l'environnement [27]. En 1998, un mémorandum a été présenté sur la protection des sols en Europe et l'élaboration de législations communes [28]. Le même type de réflexions a émergé du congrès mondial Science du sol de Montpellier (août 1998). On est désormais conscient que le sol est une ressource non renouvelable qui doit être protégée et gérée avec soin pour assurer un développement durable ■

Références

1. Fischer G, Herlig GK. Land resources : on the edge of the Malthusian precipice ? In : Greenland DJ, Gregory PJ, Nye PH, eds. *Population momentum and the demand on land and water resources*. Londres : The Royal Society Cab Int, 1998 : 9-29.
2. Robert M, Cheverry C. Les ressources mondiales en eau et en sols : une limitation pour l'avenir. *Cahiers Agricultures* 1996 ; 5 : 243-8.
3. Shiklomanov IA. Les ressources mondiales en eau. *Nature et ressources* 1990 ; 6 : 9-14.
4. Robert M, Stengel P. Soil and agriculture : soil resource quality and degradation processes. In : *Planetary garden 99. Chambéry 14-18 mars 1999*. Paris : Prospective 2100 1999 : 358-62.
5. Pedro G. Les grandes tendances des sols mondiaux. Cultivar « Sols et sous-sols ». 1984 : 68-81.

6. Buringh P. Potential of world soils for agricultural production. In : *Plenary session papers. 12th International Congress of Soil Science, New Delhi*. Indian Society of Soil Science, 1982 : 33-41.

7. Cheverry C, Robert M. La dégradation des sols irrigués et de la ressource en eau : une menace pour l'agriculture et pour l'environnement des pays au sud de la Méditerranée. *Étude et gestion des sols* 1998 ; 5 : 217-26 (numéro spécial sur les sols salés).

8. Wright RJ. Soil aluminum toxicity and plant growth. *Soil Sci Plant Anal* 1989 ; 20 : 1479-97.

9. Robert M. Le sol, une interface naturelle à préserver pour la production et l'environnement. *Cahiers Agricultures* 1992 ; 1 : 20-34.

10. Oldeman LR, Hakkeling RTA, Sambroek WG. *World map of the status of human induced soil degradation : an explanatory note*. Nairobi : Programme des Nations Unies pour l'environnement, 1990.

11. Venditti D. *Sols industriels contaminés par les métaux : caractérisation biogéochimique, approche biomoléculaire de la diversité microbienne*. Thèse, Université Nancy I, 1998 ; 328 p.

12. Oldeman LR. Soil resilience and sustainable land use. In : Greenland DJ, Szabolcs I, eds. *The global extent of soil degradation*. Wallingford : Cab Int, 1994 : 99-118.

13. Pedro G, Sherer S. Essai d'interprétation géochimique de la carte pédologique de France. *Ann Agron* 1974 ; 25 : 25-48.

14. Montier C, Le Bissonnais Y, Daroussin J, King D. *Cartographie de l'aléa « érosion des sols » en France*. Orléans : INRA, 1998 ; 33 p + cartes.

15. Wicherek SP, La Verdière MR. Les terres agricoles du Canada : dégradation et conservation. *Cahiers Agricultures* 1993 ; 2 : 245-55.

16. Robert M. *Le sol : interface dans l'environnement, ressource pour le développement*. Paris : Dunod/Masson, 1996 ; 240 p.

17. IFEN. *L'environnement en France*. Paris : La Découverte, 1998 ; 480 p.

18. Stigliani WM, Doelman W, Salomons R, Schulin GRB. Chemical time bombs, predicting the unpredictable. *Environment* 1991 ; 33 : 26-30.

19. Lal R. Soil surface management in the topics for intensive land use and high and sustained production. *Adv Soil Sci* 1986 ; 5 : 1-109.

20. Asami T. Biochemistry of trace elements. In : Adriano D, et al. *Advance in environmental science. Cadmium pollution of paddy fields and human health in Japan*. Northwood : Science reviews, 1997 : 217-64.

21. Bonny S. Can biotechnology lead to a more sustainable agriculture ? In : *Planetary garden 99. Chambéry 14-18 mars 1999*. Paris : Prospective 2100, 1999 : 132-9.

22. Bazzaz F, Sombroek W. *Changements du climat et production agricole*. Paris : FAO/Polytechnica, 1997 ; 406 p.

23. Anonyme. *Impacts potentiels du changement climatique en France au XXI^e siècle*. Paris : MATE/MIES, 1998 ; 128 p.

24. Tinker PB. Land resources : on the edge of the Malthusian precipice ? In : Greenland DJ, Gregory PJ, Nye PH, eds. *The environmental implications of intensified land use in developing countries*. Londres/New York : The Royal Society/Cab International, 1998 ; 163-73.

25. Syers JK. Land resources : on the edge of the Malthusian precipice ? In : Greenland DJ, Gregory PJ, Nye PH, eds. *Managing soils for long term productivity*. Londres/New York : The Royal Society/Cab International, 1998 ; 151-61.

26. Balesdent J. Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France. *Étude et gestion des sols* 1996 ; n° spécial 3 et 4 : 245-60.

27. Stengel P, Gelin S. *Sol, interface fragile*. Versailles : INRA, 1998 ; 213 p.

28. Grand Laurence D. Aspects of soil protection as seen by the European Commission workshop on soil protection. Bonn, 9-11 décembre 1998.

Résumé

Sols et agriculture : ressource en sol, qualité et processus de dégradation Une prospective mondiale, européenne et française

M. Robert, P. Stengel

Cette communication fait le point sur la limitation de la réserve en sols au niveau mondial et sur les principaux processus de dégradation qui la menacent. Certains de ces derniers, de nature physique (érosion et compaction) ou chimique (acidité), sont prépondérants. Dans les pays développés, les phénomènes liés à l'intensification de l'agriculture ont conduit à la dégradation des fonctions environnementales des sols et des autres composantes de l'écosystème (eau, air...). Au niveau de la fourniture alimentaire mondiale, on peut prévoir que dans les pays en développement, où la croissance de la population sera la plus forte, il y aura une limitation quantitative (eau, sols) et qualitative (contraintes environnementales à l'augmentation de la production agricole). À ces contraintes vont s'ajouter les effets prévus des changements climatiques et il n'est pas sûr que les progrès liés aux biotechnologies puissent compenser ces phénomènes. Il apparaît donc nécessaire d'avoir de meilleurs indicateurs pour suivre la qualité des sols et des écosystèmes afin de protéger la ressource en sols au niveau mondial et de la gérer d'une manière durable.
