

CHOYEZ LA TERRE

*Aménagement des sols
pour une agriculture durable
et la protection de l'environnement
sous les tropiques*





FAO 1996

Division de la mise en valeur des terres et des eaux
Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
Viale delle Terme di Caracalla
Rome 00100
Italie

Téléphone: (39-6) 5225 3964

Télécopie: (39-6) 5225 6275

D'après un texte du Professeur Dennis J. Greenland
Conçu, édité et produit par Words and Publications, Oxford (Royaume-Uni)




TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	2
LE PROBLEME	3
<i>Accroître la production tout en améliorant la qualité du potentiel en ressources</i>	
BREF HISTORIQUE	6
<i>La mise au point de systèmes d'exploitation agricole durables</i>	
Historique	6
Durabilité et non durabilité des systèmes actuels d'aménagement des sols	8
LA SOLUTION	11
<i>Instaurer des principes adéquats à une gestion correcte des sols</i>	
Maintien et amélioration de la productivité du sol	11
<i>Gestion des éléments nutritifs du sol</i>	12
<i>Gestion des conditions physiques du sol</i>	12
<i>Gestion de la matière organique et des conditions biologiques des sols</i>	15
Eviter et corriger la dégradation des sols	17
<i>Eviter l'érosion</i>	17
<i>Corriger la dégradation chimique</i>	19
<i>Eviter et corriger la dégradation physique</i>	21
Eviter les dommages à l'environnement	21
<i>Dommages hors site dus à l'érosion du sol</i>	21
<i>Dommages découlant d'une mauvaise utilisation des engrais</i>	22
L'APPLICATION DES PRINCIPES	24
<i>Les bonnes pratiques d'aménagement des sols</i>	
Systèmes durables dans les tropiques humides	24
Systèmes durables dans les régions tropicales subhumides	25
Systèmes durables dans les tropiques semi-arides	26
Systèmes durables pour les terres humides	26
LA NECESSITE D'AGIR	29
<i>Tirer parti des connaissances actuelles pour construire un avenir durable</i>	

INTRODUCTION

Au cours du XX^{ème} siècle, la population mondiale est passée de moins de deux milliards à plus de cinq milliards et demi de personnes. Il y a 100 ans seulement, les besoins de la population en denrées alimentaires, combustibles, fibres et matériaux de construction, qui ne cessaient de croître, étaient couverts grâce à une extension progressive des superficies cultivées. L'augmentation beaucoup plus forte de la population au cours de ce siècle n'a été absorbée qu'en intensifiant considérablement l'exploitation d'une grande partie des terres qui sont déjà cultivées. Au cours des 25 prochaines années, deux milliards de personnes viendront encore s'ajouter à la population mondiale. La plupart d'entre elles vivront sous les tropiques. En conséquence, les pressions qui s'exerceront sur les ressources en sol et en eau de ces régions s'accroîtront considérablement. La conception et l'application de méthodes destinées à accroître la production vivrière dans les tropiques ont énormément progressé, surtout en ce qui concerne le riz de bas-fonds ainsi que le blé et le maïs des sols plus fertiles où l'irrigation est possible. Les progrès ont été lents dans les zones moins favorisées et en ce qui concerne certaines cultures de subsistance telles que le sorgho, le mil et le manioc. En Afrique et dans certaines autres régions, l'augmentation de la production vivrière a en fait été plus lente que la croissance démographique. Lorsque la production a augmenté en Afrique, cela était dû essentiellement à l'exploitation de terres qui initialement n'étaient pas jugées aptes à la culture, ou à une intensification de la production non-durable.

Le but de la présente brochure est de résumer les pratiques passées et actuelles d'aménagement des sols dans les zones tropicales semi-arides, subhumides et humides, tout en tenant compte de l'importance de la durabilité et des problèmes de dégradation de l'environnement liés parfois à une exploitation plus intensive du sol. Elle vise à aider toutes personnes concernées par le développement agricole et l'environnement, à comprendre les problèmes de dégradation des sols ainsi que les divers degrés de compatibilité d'une production agricole accrue avec la protection de l'environnement.

La présente brochure décrit comment, à partir d'une époque où la pression démographique était plus faible, les méthodes d'aménagement des sols ont évolué pour déboucher sur des systèmes durables adaptés tant à l'environnement qu'aux conditions sociales et économiques existantes. La compréhension des facteurs qui déterminent la viabilité de ces systèmes—et de leur effondrement lorsque la pression démographique s'accroît—a permis d'établir des principes rationnels d'aménagement durable des sols. Ces principes visent, non seulement à maintenir ou à améliorer la productivité des sols, mais aussi à éviter (et, le cas échéant, à corriger) toutes formes de dégradation des sols afin de prévenir tout dommage à l'environnement. La manière dont ces principes peuvent être appliqués à la mise au point et à l'application de systèmes d'aménagement plus productifs et plus durables est également abordée dans cette brochure.

LE PROBLEME

Accroître la production tout en améliorant la qualité du potentiel en ressources

Plus d'un million d'années ont été nécessaires pour que la population mondiale atteigne le chiffre d'un milliard au milieu du siècle dernier. La population s'accroît maintenant au rythme d'environ un milliard tous les dix ans (voir Figure 1).

Curieusement peut-être, si l'on considère l'opinion de Thomas Malthus qui prévoyait en 1798 que le monde ne serait bientôt plus capable de se nourrir lui-même, la planète continue d'entretenir une population en expansion rapide.

Deux facteurs expliquent cette aptitude de la planète à absorber l'augmentation énorme du nombre de ses habitants :

- la faculté des sols à s'adapter aux pressions de plus en plus fortes qui s'exercent sur eux;
- les progrès des connaissances des agriculteurs et des scientifiques en ce qui concerne la manière d'aménager les sols de façon productive et durable.

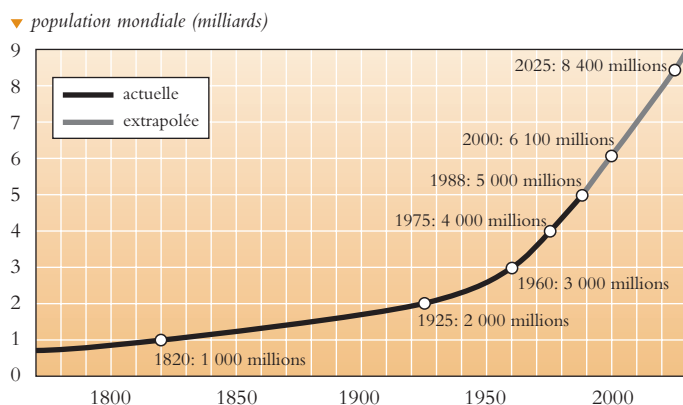
Ce qui a probablement le plus contribué à absorber la très forte croissance démographique a été la découverte des engrais minéraux. La collaboration entre un agriculteur (John Lawes) et un scientifique (Henry Gilbert) à Rothamstead (Royaume-Uni) a

permis, par la suite, d'exploiter cette découverte. Leur expérimentation en matière d'aménagement des sols a commencé il y a un siècle et demi et se poursuit aujourd'hui sur les mêmes parcelles de terre. Ces expériences montrent que, dans les conditions pédologiques et climatiques où elles ont été menées, un système viable peut être mis au point, du moins par rapport à l'environnement local, et les rendements sont en général bien plus élevés aujourd'hui qu'ils ne l'avaient jamais été auparavant (voir Figure 2). D'autres progrès réalisés dans les domaines de l'amélioration variétale et de la lutte contre les ravageurs, y compris l'utilisation des pesticides, ont évidemment apporté une contribution significative.

Le débat sur la durabilité des systèmes exigeant de forts apports de substances chimiques synthétiques porte essentiellement sur les dommages potentiels qui peuvent en découler pour la santé de ceux qui consomment les produits provenant de ces systèmes. Or, la santé de la population qui se nourrit d'aliments issus de ces systèmes intensifs de gestion n'a jamais été meilleure.

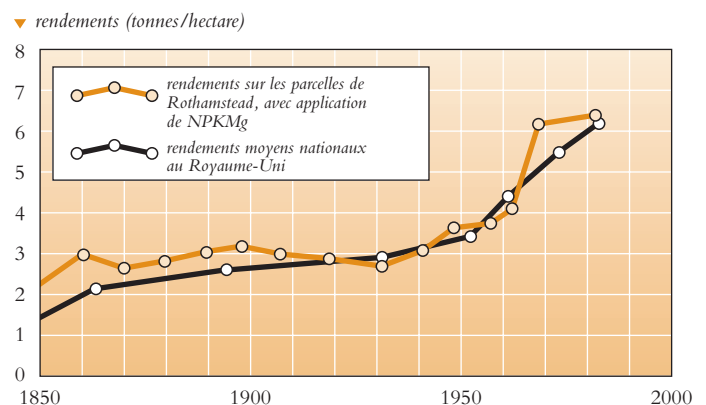
Un système d'aménagement des sols tributaire d'apports

Figure 1 Croissance de la population mondiale



La population mondiale augmente rapidement depuis le milieu du XIX^{ème} siècle et s'accroît actuellement au rythme d'environ un milliard tous les dix ans.

Figure 2 Rendements du blé sur les parcelles de Broadbalk Field, Rothamstead



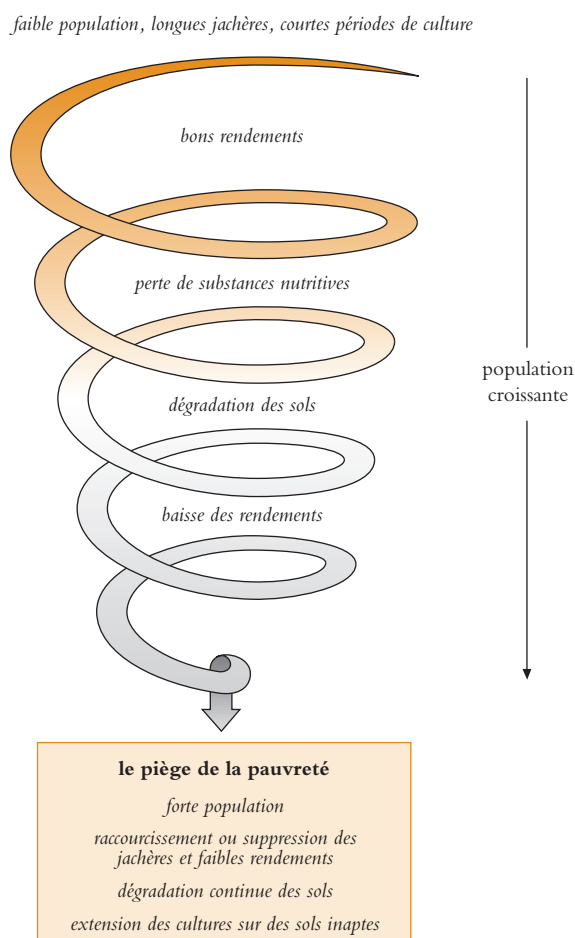
Les rendements sur les parcelles cultivées en permanence en blé de Broadbalk Field, Rothamstead (Royaume-Uni) (avec application annuelle d'engrais minéraux NPKMg) sont comparables aux rendements nationaux des superficies emblavées.

massifs d'engrais inorganiques peut être viable si on le considère de manière isolée, mais il faut également tenir compte de la durabilité des ressources minérales et énergétiques à partir desquelles les engrais sont fabriqués. En outre, les effets sur l'environnement des produits chimiques (provenant des engrais et des pesticides) qui aboutissent dans les eaux souterraines ainsi que des produits dérivés libérés dans l'atmosphère doivent aussi être pris en considération. Une attention toute particulière doit être accordée aux effets de ces produits chimiques sur les populations végétales et animales et sur leur biodiversité.

Plusieurs milliers d'années avant les travaux de Lawes et Gilbert, un système agricole durable différent avait été mis au point, dans le but de subvenir aux besoins de la population en expansion rapide de l'Asie du Sud et de l'Est. C'est le système de culture du riz des grands bassins fluviaux où le piégeage de l'eau et du limon provenant des crues annuelles des rivières a permis à la riziculture de perdurer depuis lors. Là encore, la pression démographique est devenue trop forte pour le système traditionnel, et ce n'est que grâce à l'interaction entre le scientifique et l'agriculteur—qui a finalement débouché sur la révolution verte—que les rendements du riz ont pu atteindre un niveau suffisant pour continuer à nourrir la population. Des questions se sont là aussi posées quant à la durabilité du système. Le système traditionnel dépendait des sédiments venant de l'érosion des terres d'altitude qui subissaient par là même une dégradation. La technologie de la révolution verte repose sur des apports énergétiques externes et a conduit à une augmentation du niveau des émissions de méthane et d'oxyde nitreux qui contribuent de manière importante à l'effet de serre et entraînent des changements atmosphériques qui pourraient affecter l'ensemble de la planète.

Dans le reste du monde, la pression démographique, jusqu'à une période récente, était en général bien moindre qu'en Europe et dans les grands bassins fluviaux d'Asie. Les méthodes d'aménagement des sols avaient donc moins de raisons de s'intensifier et ont évolué plus lentement. Ces régions sont aussi celles où les sols sont en général plus pauvres et les climats plus difficiles. C'est pour cette raison, dans une certaine mesure, que la croissance de la population dans cette partie du monde a été plus lente. Cependant, au cours de ces dernières années, l'amélioration de la santé et d'autres changements se sont traduits par une accélération de la croissance démographique. La demande de

Figure 3 Spirale descendante menant au piège de la pauvreté



L'intensification de l'utilisation des sols dans les zones de culture itinérante mène à des jachères plus courtes et, au dernier stade, à une dégradation des sols et une baisse des rendements. Cela donne inévitablement lieu à un système non durable incapable de subvenir aux besoins d'une population en expansion.

denrées alimentaires et d'autres produits agricoles a augmenté en conséquence. Des augmentations de la production vivrière ont été enregistrées mais surtout grâce à une extension des superficies cultivées. En Afrique, l'accroissement de la production a souvent été réalisé grâce à une intensification de la production dans les régions de culture itinérante—en prolongeant la période de culture et en raccourcissant la période durant laquelle le sol peut se reposer dans des conditions de régénération végétale naturelle. Ce type de changement engendre un système non durable (voir Figure 3).

Le principal défi auquel doivent sans doute faire face aujourd'hui les agriculteurs, économistes et spécialistes des sols, est de mettre au point des systèmes d'exploitation agricole durables tout en créant les conditions politiques et socio-économiques nécessaires à leur application de manière à ce que les sols de ces régions moins fertiles puissent nourrir une population beaucoup plus importante.

De nombreuses tentatives d'introduction de systèmes d'exploitation agricole continue dans les zones tropicales semi-arides, subhumides et humides ont échoué. Souvent, le contenu en nutriments du sol n'a pas été maintenu de façon suffisante. Parmi les autres causes d'échec, il faut citer la dégradation des sols due à un ou plusieurs des processus suivants :

- dégradation physique due à l'érosion, au tassement et à la formation d'une croûte;
- dégradation chimique liée à la perte de nutriments et à l'acidification;
- dégradation biologique associée à la perte de matière organique;
- dégradation des conditions de drainage entraînant engorgement hydrique ou salinisation.

Alors que l'exploitation des terres arables s'est souvent révélée non durable, l'arboriculture dans les zones tropicales

humides et subhumides a posé relativement peu de problèmes de durabilité. Dans les zones semi-arides, la production animale a quelquefois été viable. Les systèmes de production animale ont posé des problèmes de durabilité lorsque le cheptel a augmenté sans que la capacité de charge des pâturages ne s'accroisse. En période de sécheresse ou de pénurie d'eau, le surpâturage peut entraîner une disparition de la végétation et, partant, une exposition du sol à l'érosion éolienne. Il est donc indispensable pour les cultures et la production de pâturages de mettre au point des méthodes d'aménagement des sols économiquement viables et socialement acceptables qui soient non seulement productives mais aussi durables.

Bien qu'il reste encore beaucoup à faire, les principes fondamentaux d'un bon aménagement des sols sont maintenant bien établis. *Il faut, à présent, qu'ils soient largement diffusés et compris, évalués et adaptés aux conditions pédologiques et écologiques, sociales et économiques des différentes régions.* Les politiques requises doivent ensuite être appliquées de manière à ce que de bonnes méthodes d'aménagement des sols puissent être pratiquées pour assurer un niveau de vie satisfaisant à l'exploitant et à sa famille.

BREF HISTORIQUE

La mise au point de systèmes d'exploitation agricole durables

Historique

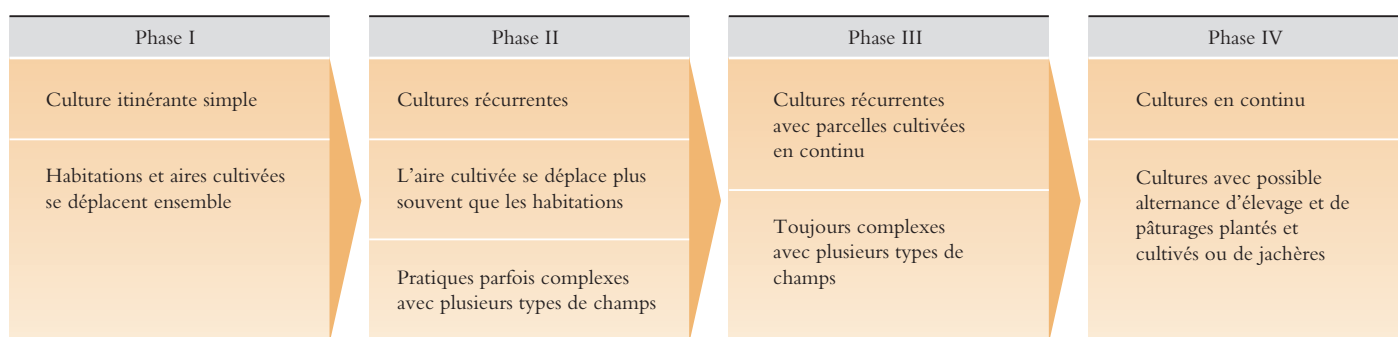
La forme la plus ancienne d'aménagement du sol remonte probablement à l'époque où les nomades—populations qui se déplaçaient de pâturages en pâturages avec leurs animaux—ont découvert qu'ils pouvaient sans problème exploiter de nouveaux territoires, mais que s'ils essayaient de pratiquer leurs cultures sur la même terre pendant plus d'une saison, ils obtiendraient des résultats moindres. Une fois la leçon apprise, la pratique de la 'culture itinérante' s'est progressivement affinée. A mesure que les techniques de construction progressaient, les communautés purent se procurer des abris plus perfectionnés de sorte qu'ils étaient moins disposés à abandonner leur habitat et s'efforçaient de produire des cultures peu éloignées du lieu où ils vivaient. Ils se fixaient pendant plusieurs années et les cultures étaient pratiquées pendant une, deux ou trois saisons jusqu'à ce que les rendements deviennent médiocres et qu'il faille exploiter de nouvelles terres. Les plus observateurs comprirent vite que certaines plantes étaient indicatrices de sols relativement fertiles dont ils pouvaient espérer de bonnes récoltes. Ils apprirent également que les cultures se développaient bien sur les lieux où des animaux avaient séjourné et que les sites précédemment habités étaient également propices.

Le système de la culture itinérante a donc évolué du stade où maisons et champs étaient abandonnés après un an ou deux, à celui où l'installation pouvait durer parfois dix ans ou plus. En outre, la plupart des cultures vivrières dont dépendait la famille étaient maintenant pratiquées en rotation, à intervalles de quelques saisons, sur des terres qui n'avaient pas été exploitées depuis des dizaines d'années. Lorsque les nomades s'établissaient, ils créaient souvent un 'jardin potager' permanent près de la maison sur des sites où des animaux avaient séjourné et sur des terres nourries par les déchets ménagers.

Cette forme d'aménagement du sol par la culture itinérante a été largement pratiquée dans le monde entier. Elle a constitué une réponse essentielle au problème d'obtenir des denrées alimentaires lorsque le sol en soi est incapable de fournir une production continue pendant une période illimitée. Ce système est durable tant qu'il y a suffisamment de terre pour permettre au sol de récupérer jusqu'à ce que sa productivité originelle soit rétablie; tout dépend également des connaissances et de l'expérience des agriculteurs eux-mêmes.

La stabilité des systèmes de culture itinérante pratiqués par des générations d'agriculteurs qui ont vécu dans la même zone pendant de nombreuses années contraste avec la non-durabilité

Figure 4 Evolution des pratiques culturales



des méthodes apparemment similaires de culture sur brûlis utilisées par les populations déplacées. Ces communautés sont souvent obligées de s'établir dans des régions convenant mal à la culture et qu'elles ne connaissent pas. L'application de méthodes de culture mal adaptées sur des sols fragiles peut alors se traduire par des dégradations irréversibles du sol après une ou deux saisons seulement. Le fait que ces communautés n'ont aucun droit d'exploitation des terres à long terme ne les incite guère à rechercher un système plus viable d'aménagement des sols.

Le rapide déclin des rendements habituellement enregistré a connu quelques exceptions et certains sols ont donné indéfiniment de bonnes récoltes. Ces sols très prisés ont fait l'objet de soins tout particuliers. Pour protéger les sols contre les fortes averses, en particulier dans les régions montagneuses où les terres arables sont rares, les agriculteurs ont appris à construire des terrasses. Celles-ci permettaient de contrôler l'écoulement de l'eau et empêchaient la terre d'être emportée. En Asie, des terrasses étaient souvent construites pour retenir l'eau de manière à permettre la culture du paddy. Certains systèmes de terrasses étaient d'une qualité telle qu'ils subsistent après des milliers d'années et jouent encore aujourd'hui un rôle déterminant (Figure 5). Alors qu'elles sont relativement courantes en Asie, les terrasses en pierre ne se trouvent qu'occasionnellement en Afrique dans les rares régions où les sols sont intrinsèquement très fertiles.

Le système de culture itinérante pratiqué sur les sols moins fertiles—qui sont les plus répandus—dans lequel des 'champs

Figure 6 Comparaison de systèmes agricoles

▼ indice du rendement potentiel

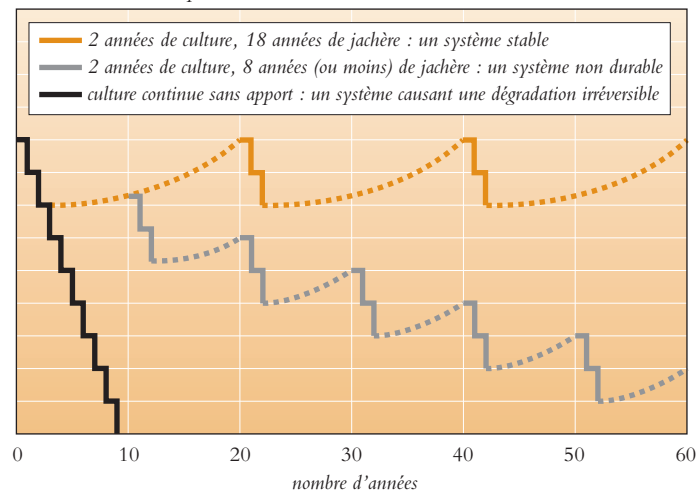


Diagramme illustrant l'évolution de la productivité potentielle du sol dans le cadre d'un système stable de culture itinérante, d'un système non durable (où la période de jachère est trop courte pour permettre le rétablissement de la fertilité) et d'un système de culture continue sans apports.

éloignés' sont cultivés pendant quelques années avant d'être mis en jachère et les jardins potagers sont cultivés de manière continue avec l'apport de fumier, reste largement pratiqué aujourd'hui. Cependant, on ne peut le considérer comme durable que si les terres disponibles sont suffisantes pour que les champs éloignés restent en jachère suffisamment longue pour reconstituer la productivité du sol—dix ans ou plus (voir Figure 6). C'est, actuellement, l'exception plutôt que la règle.

Dans certaines régions, d'autres méthodes ont été mises au point pour améliorer la fertilité des sols. On peut citer, à titre d'exemple, le système 'chitimene' pratiqué en Zambie. Sur des sols sableux particulièrement peu fertiles de nature, des branches d'arbre sont transportées des bois voisins et empilées sur l'aire à cultiver. Elles sont ensuite brûlées de manière à ce que les cendres s'incorporent aux éléments nutritifs dans la parcelle cultivée. Dans les hautes collines du Népal, la fertilité du sol a été maintenue grâce à la collecte et au compostage de feuilles et de litière provenant des forêts avoisinantes. Le compost qui est ensuite réparti sur le sol fait office de paillis qui le protège contre l'érosion et s'ajoute aux éléments nutritifs. Ces deux systèmes consistent à transférer les éléments nutritifs des bois ou

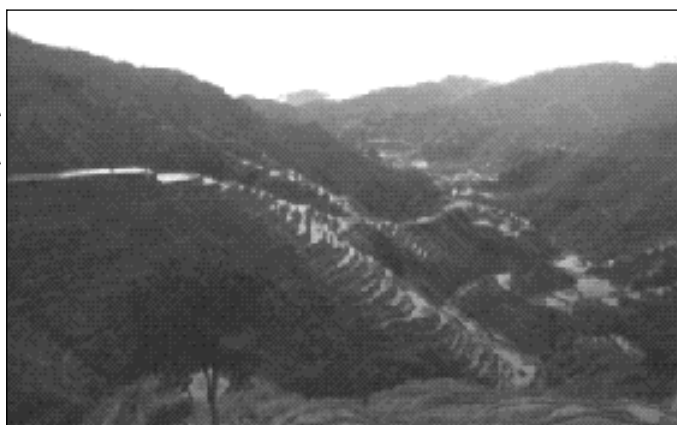


Figure 5 Anciennes terrasses en pierres sèches d'Ifugao, Banaue (Philippines)

forêts aux terres cultivées. La durabilité est là encore compromise lorsque la population à entretenir est trop nombreuse. Les arbres proches de la zone cultivée sont progressivement détruits et les matériaux ligneux doivent être prélevés plus loin. La forêt et les bois eux-mêmes deviennent moins productifs à mesure que leurs éléments nutritifs sont extraits et transférés vers les terres cultivées et, finalement, exportés sous forme de produits agricoles.

Un transfert analogue de nutriments a lieu dans les systèmes pastoraux, dans lesquels le fumier organique est utilisé pour accroître la fertilité du sol. Lorsque les pâturages sont abondants, un tel système peut être durable, mais, à mesure que la concentration des gens et des animaux s'accroît, l'épuisement des éléments nutritifs dans les zones de pâturage entraîne une baisse de leur productivité. La situation est en général aggravée par les pertes d'azote et de soufre qui se produisent lorsqu'on brûle les herbages.

En conséquence, bien que ces systèmes de cycle et de transfert des éléments nutritifs puissent être durables lorsque la densité de la population est faible, ils ne le sont plus lorsque la pression exercée sur les terres devient plus forte.

Un autre système a été mis au point il y a sept ou huit mille ans dans les terres humides d'Asie. En Chine et dans le nord de l'Inde, on a découvert que le riz pouvait être cultivé de nombreuses années dans les régions inondées proches des cours d'eau. Le riz se développait particulièrement bien lorsque l'eau n'était pas trop profonde et qu'elle s'écoulait lentement autour des plants, s'évacuant peu de temps avant que le grain soit prêt pour la récolte. À mesure que la population augmentait, toutes les terres proches des cours d'eau ont été occupées. On s'est par la suite aperçu que les sols alluviaux étaient profonds et faciles à travailler de sorte que l'on pouvait construire des diguettes de boue pour retenir l'eau qui pouvait ensuite être acheminée dans des canaux pour inonder le sol. Cela permettait de cultiver le riz sur la plaine alluviale du fleuve à une distance considérable du cours d'eau lui-même.

Contrairement aux cultures des régions d'altitude, le riz continuait à donner de bons rendements. Nous savons maintenant que cela est dû aux éléments nutritifs transportés dans les eaux de crue et déposés en même temps que le limon amené dans les champs par les crues annuelles. L'azote qui vient s'ajouter grâce à divers organismes fixateurs d'azote tels que les algues bleues, et

l'élimination efficace de la plupart des adventices par les eaux de crue contribuent aussi beaucoup au maintien des rendements dans ces conditions.

La productivité naturelle de la plupart des régions rizicoles humides semble avoir été suffisante pour maintenir les rendements entre une et deux tonnes à l'hectare pendant des siècles. Cependant, à mesure que la demande s'est intensifiée et que les zones convenant à la culture du riz se sont raréfiées, il est devenu nécessaire de trouver d'autres techniques pour accroître les rendements du riz. Parmi celles-ci, il faut citer le recours accru à toutes les formes d'engrais organiques et, ces dernières années, le remplacement progressif du fumier par des engrais minéraux. Ces techniques, conjuguées à la diffusion de variétés de riz capables de s'adapter à une meilleure fertilité, ont donné de bons résultats. L'expansion de l'irrigation résultant de la construction de barrages ainsi que l'assurance d'approvisionnement en eau de zones beaucoup plus vastes ont également joué un rôle important.

Durabilité et non durabilité des systèmes actuels d'aménagement des sols

Toutes les formes de système de production existent aujourd'hui, de l'élevage nomade aux monocultures continues intensives. Leur répartition est déterminée par les conditions pédologiques et climatiques et par des facteurs sociaux et économiques. En termes très généraux, on peut dire qu'à mesure qu'on se déplace des régions sèches vers les régions humides, l'importance des pâturages et des animaux diminue et celle des forêts encore plus. La densité de population est la plus élevée dans les régions où les sols sont les plus fertiles et les systèmes d'aménagement les plus intensifs.

La plupart des systèmes de production se sont développés de manière à être durables dans les conditions ambiantes—y compris le niveau de la pression démographique—prévalentes à une période donnée. Compte tenu du fait que la pression démographique a augmenté considérablement au cours du siècle dernier et qu'elle continuera à le faire au cours des 50 prochaines années, la durabilité en termes d'agriculture et d'aménagement des sols doit tenir compte de la nécessité de répondre à une demande accrue. La FAO (1992) a donné la définition suivante :

“Un système agricole durable est un système qui suppose l'aménagement et la conservation du capital en ressources naturelles ainsi qu'une orientation des progrès techniques et institutionnels propres à garantir l'obtention et la satisfaction continue des besoins des générations présentes et futures. Ce développement durable conserve les ressources en terre et en eau et les ressources génétiques végétales et animales, et est économiquement viable et socialement acceptable.”

Il existe de nombreuses autres définitions de l'agriculture et de l'utilisation durable des terres, définitions dont certaines sont plus simples et d'autres plus complètes (voir encadré). Ces définitions insistent toutes sur le fait que l'aménagement durable des sols ne doit pas dégrader les sols ni contaminer l'environnement tout en favorisant la production de bois, de combustibles, de fibres et de matériaux de construction.

Définitions de la durabilité agricole

“C'est la survie”

Un agriculteur de subsistance

“Peu d'apports, pas d'apports, une agriculture organique”

Un écologiste

“Vivre sur les intérêts et non sur le capital”

Un économiste

“Une bonne gestion des ressources agricoles adaptée à l'évolution des besoins de l'homme et qui préserve ou augmente la qualité de l'environnement et conserve les ressources naturelles.”

FAO Research and Technology Paper No. 4:

Sustainable Agricultural Production: Implications for International Agricultural Research. CCT/GCRAI, 1989

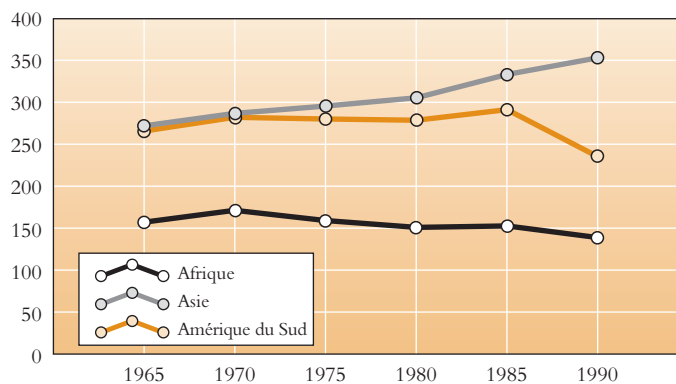
“Un système agricole durable est un système qui suppose l'aménagement et la conservation de la base de ressources naturelles ainsi qu'une orientation des progrès techniques et institutionnels propre à garantir l'accomplissement et la satisfaction continue des besoins des générations présentes et futures. Ce développement durable conserve les ressources en terre et en eau et les ressources génétiques végétales et animales, et est économiquement viable et socialement acceptable.”

FAO, 1991

Figure 7 Production par habitant de a) céréales et b) racines et tubercules en Afrique, Asie et Amérique du Sud (1965–1990)

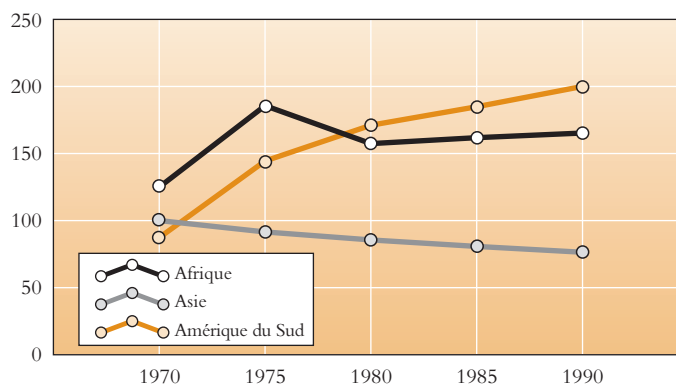
a) production céréalière

▼ kg/hab/an



b) production de racines et tubercules

▼ kg/hab/an

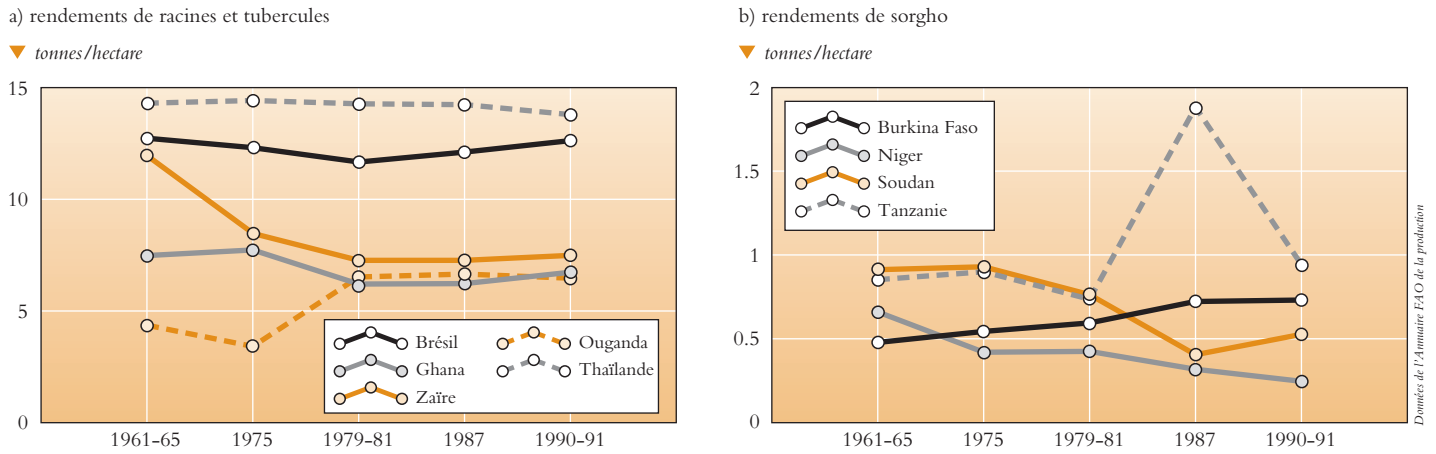


Données de l'Annuaire FAO de la production

L'agriculture est passée par divers stades, allant des systèmes de culture itinérante à des systèmes semi-permanents et des systèmes de culture continue. Actuellement l'ensemble de ces systèmes sont pratiqués dans différentes parties du monde. Tous peuvent être durables et tous peuvent échouer, en fonction des conditions biophysiques et socio-économiques dans lesquelles ils sont pratiqués. Des indices de succès ou d'échec sont fournis à travers l'évolution de la production vivrière par habitant dans les différentes régions (Figure 7).

La diminution des rendements des principales cultures de base dans certains pays d'Afrique—manioc au Zaïre, et sorgho au Soudan et au Niger—peut être particulièrement significative car elle témoigne de la diminution de la productivité des sols dans ces pays et de la mise en culture de sols marginaux (Figure 8).

Figure 8 Rendements nationaux moyens de a) racines et tubercules, et b) sorgho, dans certains pays (1961–1991)



Dans un environnement politique et social stable, les agriculteurs s'efforcent toujours de mettre en place, pour le présent et l'avenir prévisible, un système suffisamment productif pour subvenir aux besoins de leur groupe social proche. Lorsque des débouchés existent, ils s'efforceront aussi d'accroître leur production pour en tirer des avantages économiques pour eux-mêmes et leurs familles. Des difficultés se posent toutefois lorsque le contexte social, économique et politique change. Un exemple particulièrement frappant à cet égard a été l'accroissement de la demande de terre découlant de

l'augmentation de la population, qui a entraîné des conflits au sujet des ressources, tant en eau qu'en terres. La productivité n'augmentera que lorsque les conditions sociales seront favorables et c'est aux gouvernements qu'il incombe de créer de telles conditions. Dans les sections ci-après, on décrira les principes sur lesquels doivent reposer les méthodes de gestion durable des terres et l'on examinera les cas d'application réussie de ces principes dans différentes zones agroécologiques.

LA SOLUTION

Instaurer des principes adéquats à une gestion correcte des sols

La gestion judicieuse des sols a toujours impliqué que ces derniers soient utilisés de manière à maintenir, et si possible, améliorer leur productivité. Pour ce faire, il faut que les conditions chimiques et physiques du sol ne diminuent pas son aptitude à la croissance des plantes lorsque la culture commence. En fait, il est normal que la mise en culture entraîne une dégradation des sols du fait de l'exportation des éléments nutritifs au moment de la récolte et des dommages physiques que subit la structure du sol. Ce qui est essentiel est que cette détérioration soit réversible grâce à des apports d'éléments nutritifs, à des travaux mécaniques ou au processus naturel de restitution de la fertilité par la mise en place d'arbres ou d'herbages. Cela implique que le sol ait une capacité de récupération, c'est-à-dire qu'après avoir été soumis aux agressions liées à la production végétale, il soit capable de revenir à son état initial ou de s'améliorer (Greenland et Szabolcs, 1994).

La plupart des agriculteurs envisagent la gestion des terres dans la perspective des parcelles qu'ils cultivent personnellement ou auxquelles ils ont accès. Il s'ensuit que les effets des pratiques d'aménagement des sols, qui se produisent ex situ, ne reçoivent pas toujours l'attention voulue s'il n'existe pas de réglementation appropriée. Parmi ces effets, on peut citer les dépôts provenant de l'érosion ou des matériaux emportés par les cours d'eau et déposés sur les champs de fermes voisines. On peut également citer les effets des substances volatiles provenant des sols telles que les gaz à effet de serre et autres polluants potentiels. Une bonne gestion des terres doit non seulement répondre aux besoins immédiats de l'agriculteur mais également être acceptable pour l'ensemble de la communauté. Pour les cultivateurs qui ne pratiquent pas une agriculture de subsistance, le système doit également être économiquement viable de manière à leur permettre de poursuivre une bonne exploitation et d'améliorer le niveau de vie de leur famille.

Les problèmes généraux de gestion durable des terres sont examinés de manière approfondie dans World Soil Resources 73,

FESLM: *An International Framework for Evaluating Sustainable Land Management* (FAO 1993b). Ce rapport indique que les éléments fondamentaux d'une gestion durable des terres sont la productivité, la sécurité, la protection, la viabilité et l'acceptabilité.

La production des terres doit être assurée, les ressources naturelles doivent être protégées et le système d'aménagement doit être économiquement viable et socialement acceptable. Cependant, il faut également reconnaître que la terre ne peut être gérée de manière durable si le sol, qui en est une composante, n'est pas correctement exploité. Cela exige le maintien et l'amélioration de la productivité du sol ainsi que des mesures visant à éviter et à corriger sa dégradation et à prévenir les dégâts environnementaux.

Maintien et amélioration de la productivité du sol

Pour qu'un sol puisse rester productif, il doit :

- répondre aux besoins en éléments nutritifs des cultures;
- disposer d'un milieu physique :
 - dans lequel les racines des plantes peuvent se développer de manière à permettre l'absorption de l'eau et des éléments nutritifs,
 - qui stocke suffisamment d'eau pour les cultures,
 - qui permet à l'eau de pénétrer et de circuler pour compenser l'évapotranspiration par un apport hydrique suffisant;
- procurer un milieu dans lequel les organismes présents dans le sol puissent:
 - décomposer les matières organiques, libérant les éléments nutritifs nécessaires pour les cultures;
 - faciliter le transfert des éléments nutritifs vers les racines des plantes;
 - concurrencer efficacement les agents pathogènes qui risquent d'infester les racines et d'endommager les plantes;
 - générer les composés organiques du sol qui auront un effet positif sur d'autres caractéristiques pédologiques.

Gestion des éléments nutritifs du sol

Certains sols contiennent suffisamment d'éléments nutritifs pour qu'ils puissent être exploités de nombreuses années sans baisse notable des rendements, mais la majorité d'entre eux ne peuvent être exploités que quelques années avant que leur aptitude à fournir des éléments nutritifs ne se détériore. Si l'on veut maintenir les rendements et utiliser les sols pour produire des cultures de manière continue, il faut trouver une méthode permettant de remplacer l'azote, le phosphore, le potassium et les autres éléments nutritifs.

L'azote est un cas à part car il peut être fixé à partir de l'atmosphère. Ce processus naturel de fixation est dû à certains micro-organismes qui se développent librement dans le sol et à la surface des sols et des feuilles; dans le cas du riz, on les trouve à la surface et dans l'eau des rizières. D'autres micro-organismes se développent en symbiose avec les plantes, comme *Rhizobia* avec les légumineuses, *Actinorhizae* avec le genre *Alnus* et, dans les rizières et autres terres humides, *Anabaena* avec *Azolla* (voir Figure 9). De grands efforts ont été consentis pour quantifier et maximiser la contribution qui peut être faite à la nutrition azotée des cultures par fixation naturelle de l'azote et pour trouver des systèmes d'aménagement des sols tirant au maximum parti de la fixation biologique de l'azote.

D'aucuns avancent que certaines mycorhizes (champignons formant une association avec les racines) peuvent contribuer aux apports de phosphore et autres éléments nutritifs. Ils peuvent certainement, à court terme, favoriser leur assimilation par les cultures. En effet, ils absorbent le phosphore présent dans le sol plus efficacement que les racines. Cependant, c'est aussi une façon plus efficace d'exploiter le sol qui, en dernière analyse, l'épuise encore plus.

Le maintien du niveau de phosphore, de potassium et d'autres éléments nutritifs exige donc habituellement le recours à des engrais minéraux. Les quantités d'éléments nutritifs accumulés chaque année dans la biomasse sont souvent inférieures à ce qui est requis pour produire une récolte satisfaisante. Ce n'est que lorsque les éléments nutritifs de plusieurs années peuvent être cumulés pour être mis à la disposition d'une ou deux récoltes seulement qu'on obtient des récoltes rentables. De même, si des animaux ou des arbres ne sont pas utilisés pour accumuler des éléments nutritifs sur de grandes surfaces pour les concentrer sur une aire beaucoup plus restreinte de terres de culture, les éléments nutritifs ne pourront assurer qu'une faible productivité. Les engrais organiques contiennent un dosage équilibré d'éléments nutritifs essentiels et ont d'autres effets bénéfiques sur le sol, mais le coût—en temps et en travail—du transport du fumier jusqu'à son point de destination est souvent considérable. En revanche, les engrais minéraux sont beaucoup moins encombrants et plus faciles à utiliser. Ainsi, 100 kg d'urée contiennent autant d'azote que 2 000 kg de fumier ou 4 000 kg de litière végétale; il serait nécessaire d'utiliser 1 000 kg d'un bon compost pour fournir une quantité équivalente d'azote. La consommation énergétique moindre qu'exige la production d'engrais organiques est souvent considérée comme un avantage, mais les agriculteurs préféreront peut-être payer le prix plus élevé des engrais minéraux simplement parce qu'ils sont plus faciles à manipuler et à appliquer. Cela vaut surtout dans un système où d'importantes quantités d'excréments doivent être transportées jusqu'aux champs, le coût de la main-d'oeuvre de l'agriculteur pouvant alors être encore plus élevé. En Chine, ces dernières années, les quantités d'engrais organiques utilisées ont sensiblement baissé tandis que l'utilisation des engrais minéraux a rapidement augmenté.

Gestion des conditions physiques du sol

Dans des conditions de couverture végétale naturelle, les sols recèlent normalement une intense vie animale. Ces animaux

Professeur D.J. Greenland, F.R.S.



Figure 9 On peut voir ici dans une rizière de Chine la fougère aquatique *Azolla* qui héberge *Anabaena* fixatrice d'azote.

survivent grâce aux racines et à la litière végétale, et font des trous et terriers qui maintiennent le sol aéré et friable. Lorsque la végétation est éliminée pour permettre la culture, le sol est exposé à l'impact des pluies et aux actions anthropiques, aux activités des animaux et aux effets des machines qui compactent et tassent le sol. Le tassement rend le sol moins propice à la prolifération des racines et réduit sa capacité à retenir l'eau dont les plantes ont besoin pour survivre. L'exposition et l'assèchement du sol qui en découlent peuvent aussi entraîner la formation de croûtes. L'eau a, de ce fait, plus de mal à pénétrer dans le sol ce qui peut provoquer un ruissellement de surface entraînant un phénomène d'érosion.

Dans les régions arides et semi-arides, l'exposition de certains sols due au surpâturage ou à la pratique de brûlis annuel peut aussi entraîner un tassement et la formation de croûtes de surface même lorsque le sol n'est pas cultivé. La gestion de l'eau sur les sols argileux lourds est un problème sérieux et des instruments aratoires simples ont été conçus pour créer des ados qui permettent l'écoulement de l'eau excédentaire sans provoquer d'érosion (Figure 10).

La gestion des caractéristiques physiques d'un sol doit donc viser à préserver la structure de ce dernier (lorsqu'elle est déjà propice à la production végétale) ou à l'améliorer par une préparation mécanique appropriée ou d'autres méthodes lorsque le sol n'est pas structuré (FAO, 1993c). La préparation du sol est aussi importante pour la lutte contre les adventices qui est souvent

la principale justification du labour. Cependant, l'arrivée des herbicides a dans de nombreux cas rendu le labour inutile et permis aux techniques de préparation minimum ou nulle du sol, de donner de bons résultats. Les dégâts que subi la structure du sol du fait du labour, peuvent être évités grâce à ces techniques. Elles diminuent également les pertes en matières organiques et la formation de 'semelles de labour' qui inhibent le développement des racines et la circulation de l'eau dans le sol.

Si le sol est naturellement bien structuré—comme c'est souvent le cas après une longue période sous couvert forestier—il est facile à ensemercer. En effet, dans les systèmes de culture itinérante, on peut obtenir un peuplement satisfaisant en introduisant la semence dans le sol au plantoir, à condition que la terre soit défrichée de manière à ne pas perturber l'horizon de surface. Ces techniques manuelles ou utilisant une lame sont en général satisfaisantes, mais le défrichage au bulldozer sans lames a parfois provoqué de graves dégâts à l'horizon de surface et compromis la mise en culture. De nombreux semoirs manuels simples ont été conçus pour les sols sans préparation, ainsi que des machines plus perfectionnées pour des surfaces plus grandes (Figure 11).

Un avantage majeur des systèmes de culture sans préparation du sol ou avec une préparation minimum est qu'ils peuvent être utilisés pour laisser une couverture de résidus de culture sur le sol afin de le protéger de l'impact direct de la pluie. Cela empêche la dispersion des matériaux constituant les agrégats et maintient la



Figure 10 Les deux photos ci-dessus montrent des exemples de sols argileux lourds (Vertisol). Ils sont souvent engorgés (photo de gauche) mais peuvent être aménagés par la création d'ados permettant l'écoulement de l'eau excédentaire (photo de droite).

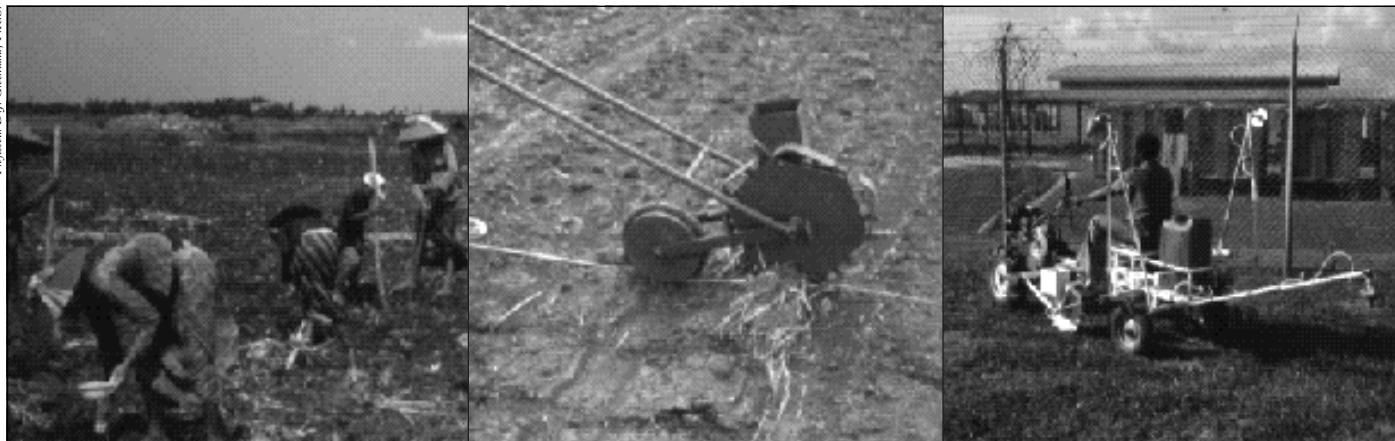


Figure 11 Trois exemples de méthodes de plantation sans préparation du sol: canne planteuse (photo de gauche), plantoir mécanique (photo du centre) et semoir automatique (photo de droite).

capacité d'infiltration du sol, ce qui minimise le ruissellement et les problèmes d'érosion qui en découlent. Dans les zones plus sèches, le couvert végétal est aussi important pour protéger le sol de l'érosion éolienne. On reconnaît à présent que le maintien d'une couverture végétale sur le sol est le facteur essentiel pour sa conservation. Lorsqu'il y a une saison sèche marquée, les termites peuvent détruire les résidus végétaux de sorte que le sol se trouve exposé et vulnérable au début de la saison des pluies. D'autres matériaux de paillage doivent alors être trouvés (herbes ou branches provenant des arbres des alentours) ou d'autres méthodes, telles que bandes enherbées ou bourrelets en courbes de niveau (Figure 12), doivent être utilisées pour éviter l'érosion. Il peut s'agir de simples bourrelets en terre construits de manière à acheminer l'eau vers un canal enherbé pour éviter la formation de

ravinements. Des barrières herbacées sur la courbe de niveau ralentissent le ruissellement et filtrent le matériel sédimentaire en suspension dans l'eau. *Vetiveria zizanioides* est particulièrement adaptée à ces fonctions.

Le vent peut provoquer une érosion du sol dans les régions plus sèches; la meilleure solution pour y faire face est de planter des arbres en coupe-vent, bien que les résidus végétaux laissés à la surface du sol soient tout aussi efficaces. Dans la plupart des régions semi-arides, après une saison sèche prolongée, les résidus végétaux sont rares et la mise en culture est généralement possible après un simple hersage de surface (Figure 13).

La gestion des conditions physiques d'un sol destiné à la production de riz de bas-fonds est complètement différente de celle qui est applicable aux cultures de montagne. L'objectif est de



Figure 12 Haies pour lutter contre l'érosion (photo de gauche); bourrelets en courbes de niveau (photo du centre) et *Vetiver* pour stabiliser la pente (photo de droite).

Professeur D.J. Greenland, F.R.S.



Figure 13
Passage à la herse pour éliminer les mauvaises herbes et préparer un lit de semis, Sénégal

détruire, et non de préserver, la structure du sol pour minimiser l'infiltration ou faire en sorte que l'eau reste à la surface du sol. On y parvient généralement en cultivant le sol lorsqu'il est gorgé d'eau—méthode connue sous le nom de 'piétinage'. Cette méthode permet la formation d'une couche qui minimise les pertes d'eau dues à la percolation et ameublité l'horizon de surface de sorte que les plants de riz sont faciles à repiquer (Figure 14).

Dans de nombreuses régions d'Asie, l'usage est de pratiquer une autre culture après la récolte du riz, au début de la saison sèche qui suit la mousson. Le sol qui a été piétiné et dont la

Professeur D.J. Greenland, F.R.S.



Figure 14 Préparation des rizières (photo du haut) et repiquage du riz (photo du bas)



Figure 15 Etats comparés d'un sol piétiné après une récolte de riz

Professeur D.J. Greenland, F.R.S.

structure a été détruite doit être restructuré autant que possible pour constituer un lit de semis pour la culture suivante qui est souvent du blé dans les régions subtropicales et du haricot mungo ou une autre légumineuse dans les tropiques. La capacité d'expansion et de rétraction de certains sols leur permet de se restructurer naturellement. Dans la plupart des cas, cependant, des mottes se forment et le labour est difficile, voire impossible (Figure 15). Des semoirs ordinaires tels que les semoirs en forme de T inversé ont été conçus pour pouvoir s'adapter à l'état physique du sol le long de la ligne de semis et éviter la dépense d'énergie qu'exigerait la mise en culture de la masse totale du sol.

Gestion de la matière organique et des conditions biologiques des sols
On n'insistera jamais assez sur l'importance de la matière organique dans la productivité des sols, plus particulièrement des sols tropicaux de qualité moindre. L'apport direct de la matière organique aux besoins en azote et en soufre des cultures, et son rôle dans la stabilisation des agrégats du sol et la survie de la faune du sol qui est à l'origine des pores par lesquels l'eau et l'air circulent, ont déjà été évoqués. En outre, la matière organique du

sol joue un rôle majeur dans la rétention des éléments cationiques par les sols dominants des tropiques contenant des argiles kaolinitiques et des oxydes de fer et d'alumine—argiles de faible activité et rétention d'éléments cationiques. En outre, dans des conditions acides, certains des composants organiques présents dans le sol forment des complexes avec l'alumine qui, autrement, serait toxique pour les plantes. Enfin, les composantes organiques du sol entravent la formation de complexes non solubles de fer et d'alumine associé au phosphore—évitant ainsi une diminution de la quantité de phosphore disponible pour les plantes.

Outre ces effets physiques et chimiques, la matière organique constitue le substrat de la quasi-totalité de la vie biologique du sol. On sait que le sol contient des organismes vivants qui lui sont directement profitables, comme ceux qui servent à la fixation de l'azote et au maintien d'une structure favorable. La matière organique empêche aussi la prolifération d'organismes pathogènes qui se trouvent en concurrence avec des colonies organiques plus importantes et plus variées que dans les sols dont la teneur en matière organique est faible.

Dans des conditions de couvert végétal naturel, la teneur en matière organique du sol tend à se fixer à un niveau relativement élevé. Elle dépend en fait de la matière organique provenant de la végétation, des caractéristiques des sols ainsi que de leur humidité et de leur température. Lorsque le sol est cultivé, l'apport de la culture est en général bien inférieur à celui de la végétation naturelle, de sorte que la teneur en matière organique a tendance à diminuer. Cela est particulièrement vrai lorsque les techniques culturales aèrent le sol et accroissent la vitesse de décomposition des débris organiques.

Les pertes en matière organique sont particulièrement élevées lorsqu'une forêt tropicale ombrophile est défrichée et qu'elle est remplacée par un système de culture. La régénération de la forêt après une période de mise en culture, comme dans le système de culture itinérante, entraîne une augmentation progressive de la teneur en matière organique qui, en règle générale, ne retrouvera son niveau initial qu'au bout de dix ans ou plus.

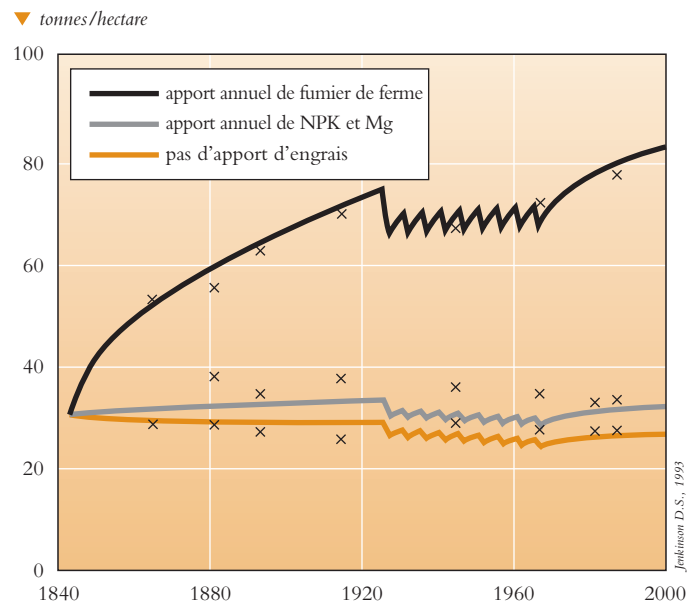
Les feux de brousse et de savanes tropicales ont souvent lieu au moins une fois l'an. Cette pratique détruit une grande part de la matière organique qui se réintègrerait sans cela au sol, de sorte que la teneur en matière organique est bien inférieure à celle que l'on trouve habituellement sous forêt. Si des cultures appropriées sont pratiquées et que tous les résidus sont restitués au sol, le niveau qui

s'établit après la récolte peut être proche de celui que l'on trouve dans les herbages naturels. Cependant, lorsqu'on alterne pâturages et cultures, la teneur en matière organique du pâturage peut être bien supérieure à ce qu'elle est lorsque le sol est cultivé, en particulier si le pâturage comporte des légumineuses qui contribuent à l'apport d'azote nécessaire à la constitution du potentiel en matière organique.

Il est donc évident que l'alternance d'une culture avec une jachère arbutive ou une période de pâturage entraînera des fluctuations de la teneur en matière organique du sol. Ces changements peuvent être estimés par une méthode mathématique approximative, et des modèles adéquats peuvent être conçus pour aider à prévoir les effets des différentes pratiques d'aménagement au niveau de la matière organique du sol. Les résultats de ces modélisations pour trois systèmes différents d'aménagement du sol sont illustrés à la Figure 16.

Un principe général des systèmes d'aménagement durable des sols doit donc être de restituer autant de matière organique que possible aux sols de montagne utilisés à des fins de culture—sous réserve que cette matière organique soit exempte de contaminants

Figure 16 Carbone organique contenu dans le sol (0–23cm)



Changements à long terme des quantités de carbone organique présentes dans le sol sur des parcelles de blé cultivées en continu à Broadbalk Field, Rothamstead (Royaume-Uni). Les croix correspondent aux données mesurées, les lignes à des calculs types. Entre 1925 et 1965, une jachère complète était pratiquée tous les cinq ans pour lutter contre les adventives.

toxiques, et que les coûts et problèmes liés à sa collecte et à son épandage soient socialement et économiquement acceptables.

Dans les plaines humides, de la matière organique toxique peut se former lors de la décomposition anaérobie de matières ajoutées, et du méthane, gaz à effet de serre actif, risque d'être libéré. Il faut donc faire preuve de prudence lorsqu'on utilise de la matière organique pour la production rizicole.

Pour les sols autres que les tourbières et humus de certaines terres humides où se sont accumulées d'importantes quantités de matière organique, cette dernière est si importante que les quantités contenues dans le sol sont le meilleur indicateur de son état et de l'évolution de son potentiel de productivité.

Eviter et corriger la dégradation des sols

Les principales formes de dégradation des sols peuvent être dues, soit à son ablation (érosion due à l'eau et au vent), soit à sa détérioration in situ ce qui implique en général une altération de ses caractéristiques tant chimiques que physiques. La dégradation chimique se caractérise comme suit :

- perte d'éléments nutritifs et de matière organique;
- acidification (liée le plus souvent à la perte d'éléments nutritifs du sol ou à une mauvaise utilisation des engrais);
- intensification du lessivage (en cas de destruction du couvert végétal et de dénudation du sol);
- augmentation des températures et oxydation de la matière organique du sol (suite à la dénudation du sol et à sa mise en culture);
- salinisation et sodification (souvent liées à de mauvaises pratiques d'irrigation et de drainage);
- pollution (généralement à la suite d'une mauvaise gestion des déchets industriels et miniers).

La dégradation physique s'accompagne dans la plupart des cas de la formation d'une croûte et d'un tassement du sol et, parfois, d'hydromorphisme en partie causé par ces phénomènes.

Le Projet GLASOD, qui est un essai d'évaluation mondiale des causes et de l'étendue de la dégradation des sols, a récemment été finalisé (Oldeman, Hakkeling et Sombroek, 1991). Les données du projet ont été obtenues à partir de la compilation par des scientifiques nationaux d'évaluations réalisées en utilisant des critères communs et portant sur l'étendue et le degré de la dégradation des sols dans leurs pays ou régions respectifs. Les données ne correspondent pas toutes à une dégradation découlant

de mauvaises pratiques d'aménagement et il a fallu dans certains cas les compiler à partir d'estimations brutes. Néanmoins, elles fournissent une indication de l'ampleur générale du problème et de ses causes (voir Figure 17).

Certaines formes de dégradation du sol peuvent être facilement corrigées. C'est le cas, par exemple, des croûtes de surface et du tassement auxquels on peut remédier sur de nombreux sols arables par la mise en culture, bien que ces améliorations risquent d'être provisoires. L'augmentation de la teneur du sol en matière organique grâce à une période de repos de la terre ou l'incorporation d'engrais organiques peut donner des résultats plus durables. Certaines autres formes de dégradation des sols, qui entraînent des effets plus graves, sont moins faciles à corriger. C'est le cas des problèmes de salinisation (augmentation de la teneur en sel) ainsi que de la sodification ou, comme on l'appelait auparavant, de l'alcalinisation (augmentation de la proportion de sodium présente dans le sol). La sodification entraîne une dispersion de l'argile et inhibe la circulation de l'eau dans le sol.

Les effets de la dégradation du sol peuvent, en fait, être plus ou moins facilement corrigés selon la gravité du problème qui dépend elle-même des pratiques d'aménagement. Certains sols sont plus résistants à certaines formes de dégradation que d'autres, de sorte que les mesures correctives varient, elles aussi en efficacité selon les types de sol (Figure 18).

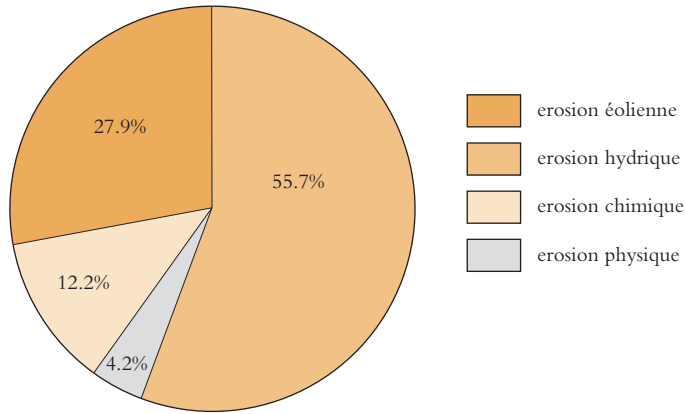
De nombreux sols des régions tropicales subhumides et semi-arides ont des caractéristiques qui les placent dans la catégorie des 'sols fragiles', notamment ceux dont la surface est facilement érodable. Ces sols doivent être bien gérés si l'on veut éviter la dégradation qui est difficile et coûteuse à corriger. Le tassement du sous-sol, qui entraîne un mauvais drainage, est une autre forme de dégradation qui est souvent irréversible. De nombreux sols, par ailleurs, sont 'résilients' d'un point de vue chimique, c'est-à-dire que les éléments nutritifs peuvent être restitués par un apport d'engrais et de fumier et que l'acidité peut être corrigée grâce au chaulage, ou du moins améliorée par l'utilisation des fumures organiques.

Eviter l'érosion

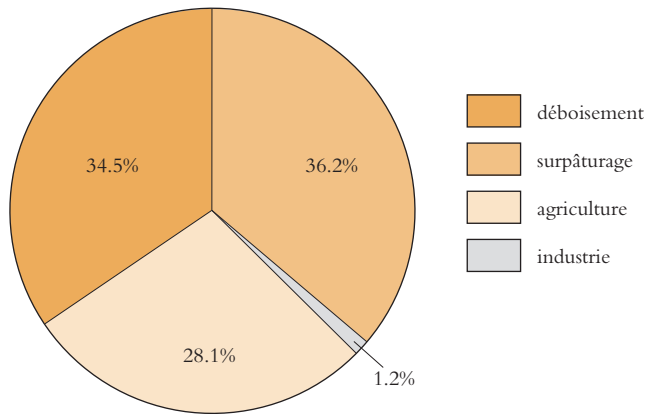
L'érosion est un processus naturel qui est difficile à éliminer complètement. Cependant, sur les terres cultivées, le risque d'érosion accélérée est réel si le couvert végétatif naturel du sol est

Figure 17 Dégradation mondiale des sols

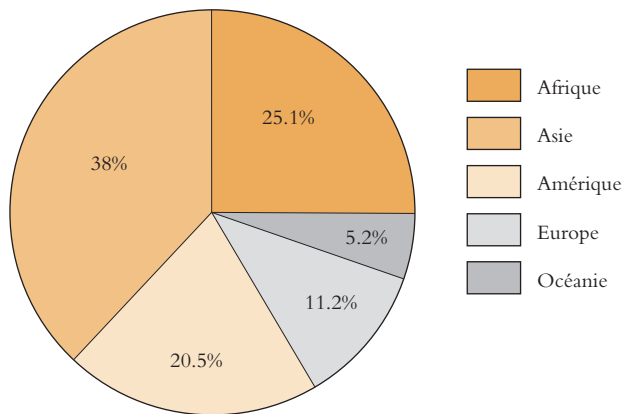
a) types de dégradation



b) causes



c) part de dégradation totale par continent



Oldeman, Hakkeling et Sombroek, 1991

Figure 18 Réaction du sol à la dégradation

▼ indice de rendement potentiel

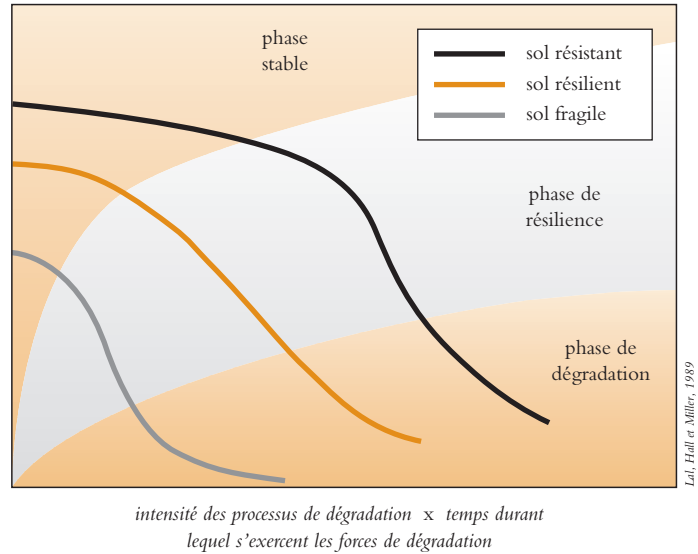


Diagramme représentant le comportement de différents sols soumis à une dégradation. Les sols résistants sont capables de supporter les effets du stress pendant une période relativement longue au cours de laquelle leur potentiel productif sera peu affecté; ils sont aussi en mesure de récupérer après une longue période consécutive de stress. Les sols 'résilients' ont une phase de résistance plus courte mais une aptitude de récupération comparable à celle des sols résistants. Les sols fragiles sont peu résistants face aux forces de dégradation.

éliminé, comme c'est en général nécessaire si la terre doit être mise en culture. Sur les terres particulièrement vulnérables, les effets de l'érosion hydrique peuvent être dévastateurs (Figure 19).

Les pratiques de gestion qui visent à maîtriser l'érosion du sol provoquée par l'eau exigent tout d'abord que tout soit fait pour conserver la couverture du sol. Il s'agira en général d'une forme ou d'une autre de végétation, mais il peut également s'agir d'un paillis de matière organique ou même de plastique ou de gravier. Une pratique garantissant la mise en culture continue peut aussi constituer une méthode valable de lutte contre l'érosion. Les cultures pérennes ou les systèmes de cultures intercalaires sont un bon moyen d'assurer une couverture compatible avec une utilisation rentable du sol (FAO, 1983, 1989). Généralement, ces méthodes ne conviennent pas à la culture mécanisée de grandes extensions. Les arbres utilisés comme coupe-vent pour lutter contre l'érosion éolienne sont en général essentiels dans les zones sèches où les sols ont une texture légère, au même titre que les bourrelets en courbes de niveau et les canaux destinés à permettre l'écoulement de l'eau dans les zones exposées à l'érosion hydrique.

Professeur D.J. Greenland, F.R.S.



Figure 19 Erosion catastrophique au Nigéria (photo du haut) et au Mexique (photo du bas)

plusieurs années sous jachère de récupération consécutive à une ou deux années de culture. Pour de nombreux sols de montagne des régions tropicales, les méthodes les plus satisfaisantes en termes de durabilité semblent être celles qui font intervenir aussi bien des engrais minéraux que des fumures organiques. Des expériences menées au Burkina-Faso et au Ghana ont montré qu'en utilisant des méthodes de gestion de ce type, les rendements ont été maintenus et ont même augmenté sur une période allant jusqu'à 30 ans (Figure 22).

Il est possible de maintenir les rendements en corrigeant aussi bien les pertes d'éléments nutritifs que l'acidification rien qu'avec des produits minéraux. Cependant, dans de nombreux sols tropicaux, il semble être extrêmement difficile de maintenir un bon dosage des éléments nutritifs sans recourir à des amendements



Figure 20 Réponse du maïs à une application d'engrais phosphatés, Tanzanie

D'autres techniques telles que la culture sur billons closonnés et la culture en bandes alternées peuvent aussi être efficaces pour lutter contre l'érosion (FAO, 1983, 1984, 1987, 1989).

Corriger la dégradation chimique

Pour la majorité des sols, la dégradation chimique due aux prélèvements des éléments nutritifs par les cultures ne peut être évitée. Elle peut cependant être facilement corrigée (Figures 20 et 21), grâce à l'apport d'engrais et/ou de fumier. Le prélèvement continu d'éléments nutritifs par les cultures ou l'utilisation d'engrais ammoniacués finit par aboutir à un phénomène d'acidification. Ce dernier peut à son tour être corrigé par une utilisation adéquate du chaulage ou par un repos du sol pendant



Figure 21 Expérience d'apport d'engrais à long terme (NPK +/- sarclage) à l'Institut International d'Agriculture Tropicale, Ibadan (Nigéria).
De gauche à droite : -NPK+sarclage; +NPK-sarclage; +NPK+sarclage; -NPK-sarclage.

organiques pour atténuer les changements qui se produisent dans les concentrations du sol en ions nutritifs et pour complexer les ions toxiques, tels que l'aluminium, qui se dégagent à mesure que le sol s'acidifie.

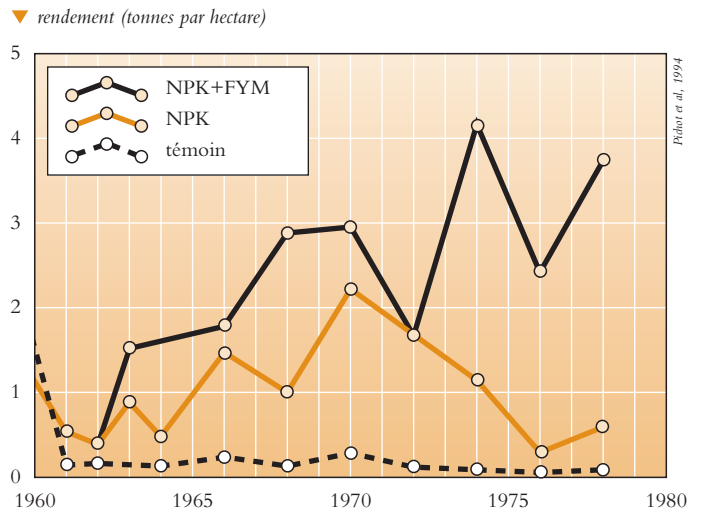
Une autre forme de dégradation du sol est la perte de matière organique, non tant à cause de ses effets directs que du fait de ses nombreux impacts indirects. Outre l'effet tampon sur les concentrations en ions nutritifs et la fixation des ions potentiellement toxiques, les avantages indirects incluent des effets stabilisateurs sur les agrégats du sol et une contribution à la faune et aux micro-organismes vivant dans le sol.

On est confronté à une autre variante de dégradation du sol lorsque les sols sont mal drainés ou que la nappe phréatique est proche de la surface. Des sels et parfois des ions potentiellement toxiques tels que le bore peuvent être véhiculés dans les champs irrigués en même temps que l'eau d'irrigation. En l'absence d'un drainage adéquat et d'un approvisionnement en eau suffisant pour éliminer les sels et ions excédentaires indésirables, le sel s'accumulera jusqu'à ce qu'il atteigne un niveau qui freine la croissance des végétaux. Ce problème est courant dans les zones où des barrages ont été construits et où les terres en aval du barrage reçoivent l'eau d'irrigation. De même, l'eau stockée en amont du barrage entraîne souvent un relèvement de la nappe phréatique dans les zones situées en aval. Lorsque les eaux souterraines sont salines, cela n'entraîne pas seulement des problèmes de salinité mais rend inévitablement le drainage de la zone irriguée plus difficile.

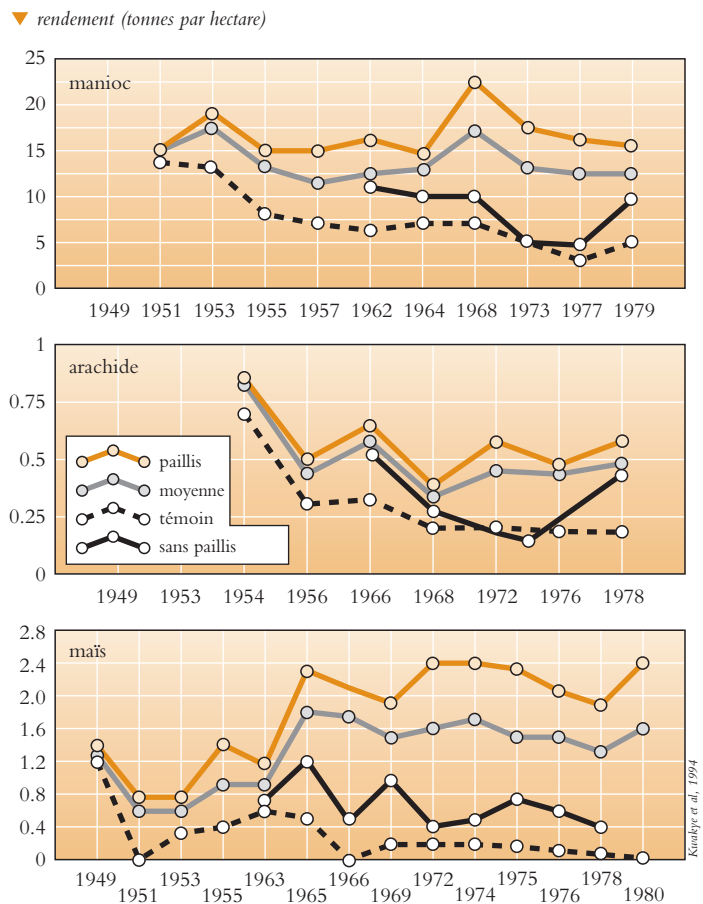
Outre la salinité, la sodification peut poser de graves problèmes. Cela n'est pas nécessairement lié à un mauvais drainage mais survient lorsqu'on utilise de l'eau d'irrigation à forte teneur en sodium ou de l'eau de mer. Le sodium déplace les autres ions dans le complexe absorbant et l'argile se disperse lorsque la saturation en sodium atteint environ 15 pour cent. Cela rend le sol extrêmement difficile à travailler—il devient très collant lorsqu'il est humide, des mottes se forment lorsqu'il est sec et les particules d'argile les plus fines auront tendance à migrer vers le bas du profil, phénomène parfois connu sous le nom d'érosion interne. Le sous-sol devient ainsi extrêmement compact, ce qui gêne beaucoup la circulation de l'eau et le développement des racines. Dans la plupart des cas, ces sols sont en plus alcalins, de sorte qu'on les classe souvent dans la catégorie des sols alcalins. Cependant, de nombreux sols salins sont également alcalins du fait

Figure 22 Effets des engrais minéraux et amendements organiques sur l'évolution à long terme des rendements

a) rendement du sorgho avec application d'engrais et de fumier, Burkina Faso



b) rendements du manioc, de l'arachide et du maïs avec paillis herbeux et application de NPK at chaux (essai factoriel 2⁵), Kwadaso, Ghana



de la présence de carbonate de sodium, mais ils n'ont pas les caractéristiques des sols sodiques car les sels empêchent la dispersion de l'argile. La gestion des sols sodiques nécessite l'apport de gypse, qui confère au sol une teneur en sulfate de calcium suffisante pour flocculer l'argile, ce qui donne une structure plus facile à travailler. Le calcium écarte aussi progressivement le sodium du complexe absorbant, supprimant ainsi la cause du mal.

La plupart des problèmes de salinité et de sodicité sont liés aux systèmes d'irrigation. Le drainage et l'application de gypse sont les remèdes à préconiser. Le drainage devrait toujours être prévu dans la conception d'un système d'irrigation et ne devrait être utilisé à des fins agricoles que si la qualité de l'eau est satisfaisante (FAO, 1985a, 1985b, 1988, 1990).

Éviter et corriger la dégradation physique

La dégradation de la structure du sol est la forme la plus courante de dégradation physique et se caractérise par :

- une perte de la stabilité des agrégats dans les sols superficiels, ce qui provoque croûtes et tassement, rendant l'infiltration plus difficile et augmentant le ruissellement et l'érosion;
- un déplacement des particules d'argile vers les couches subsuperficielles et la perte de porosité dans ces horizons et dans les couches plus profondes, ce qui nuit à la circulation de l'eau et à la capacité de stockage.

La dégradation physique des sols se produit surtout lorsque l'on utilise une mécanisation lourde pour défricher et cultiver le sol. Les sols à texture moyenne et à faible teneur en matière organique, en particulier les sols argileux et limoneux, sont les plus fréquemment touchés par ces problèmes.

On peut éviter ces difficultés en s'abstenant de travailler le sol et en pratiquant les techniques de paillage tout en respectant l'impératif de ne cultiver le sol que lorsque celui-ci n'est pas trop mouillé—un sol détrempé est facilement endommagé par la mise en culture. Le maintien d'une teneur en matière organique relativement élevée peut contribuer à accroître la stabilité des agrégats, bien que, même dans ces conditions, le sol risque d'être dégradé s'il est cultivé alors qu'il est mouillé. Comme on l'a constaté plus haut, la plupart des rizières sont délibérément 'endommagées' par la mise en culture de terres engorgées pour minimiser l'infiltration de l'eau.

La dégradation physique est souvent sous-estimée car elle est insidieuse, se développant dans le sous-sol sur une période de

plusieurs années. Pour cette raison, les données de GLASOD sont probablement en deçà de la vérité. Lorsque le sol est en jachère, la faune du sol peut réouvrir les pores tant à la surface qu'en profondeur, mais ce phénomène est lent et prend plusieurs années, même dans le cas d'une couverture forestière tropicale. Il vaut mieux prévenir le problème que tenter de le corriger.

Éviter les dommages à l'environnement

Les pratiques d'aménagement du sol n'affectent pas seulement le site où la culture est pratiquée mais aussi les zones qui en sont plus éloignées. Les effets hors site incluent ceux liés au dépôt des produits d'érosion du sol, à la pollution de l'eau due à une utilisation inadéquate d'engrais et de pesticides et à la production de gaz contribuant à l'effet de serre. Ces problèmes ne se posent pas lorsque l'on applique de bonnes pratiques de gestion des sols.

Dommages hors site dus à l'érosion du sol

Dans les régions semi-arides, la végétation meurt et le sol est exposé à l'érosion éolienne durant les périodes de sécheresse qui souvent ponctuées de tempêtes de sable. Les dépôts de particules posent de nombreux problèmes et des dunes peuvent se former, recouvrant de fines particules de sable et de limons grossiers stériles des terres qui auraient pu être cultivées. Dans les zones arides où les sécheresses peuvent durer plusieurs années, le problème est difficile à maîtriser. Dans les zones semi-arides, l'implantation d'arbres résistant à la sécheresse qui servent de coupe-vent peut être extrêmement utile. Des bandes enherbées de variétés robustes et résistantes à la sécheresse (comme le vétiver, par exemple) sont également très efficaces pour piéger le sable et stabiliser les dunes. Les dépôts des produits d'érosion du sol transportés par l'eau peuvent aussi constituer un problème grave dans la mesure où ils risquent d'enterrer des sols de bonne qualité sous du matériel moins fertile. Plus fréquemment, ils provoquent des dégâts en obstruant les cours d'eau, y compris ruisseaux et rivières. Cela peut entraîner des problèmes supplémentaires dus au relèvement des nappes phréatiques, et aux problèmes d'hydromorphisme et de salinité qui en découlent. Les sédiments peuvent aussi se déposer dans des réservoirs (Figure 23), ce qui réduit la capacité de stockage de ces derniers et, dans des cas extrêmes, obstrue l'écoulement vers les générateurs hydroélectriques. Le fait de ne pas tenir suffisamment compte des problèmes d'érosion qui se posent dans les bassins versants des

barrages s'est souvent traduit par une surestimation de la durée et de la valeur économique totale des barrages (voir encadré).

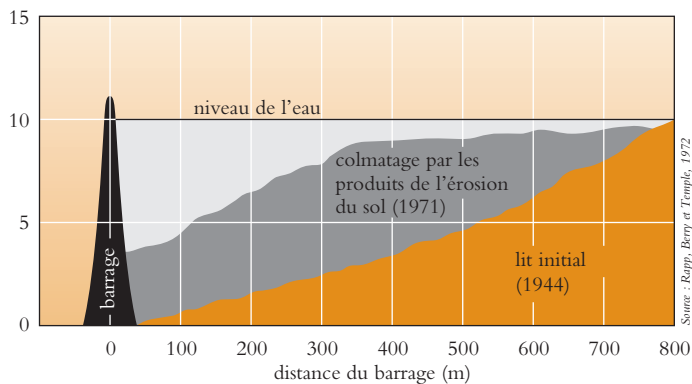
Lorsque le bassin versant est situé dans des zones de montagne ou de colline, il est d'une importance vitale d'éviter le déboisement. Lorsque des superficies cultivées se trouvent dans le bassin versant, il faut maintenir une couverture végétale pour minimiser le ruissellement. Une bonne conception des canaux destinés à l'écoulement des eaux de ruissellement excédentaires est également impérative.

Dans les régions arides et semi-arides, le surpâturage est un facteur notoire de dénudation des sols. Cela se produit fréquemment au-dessus des petits réservoirs auxquels les animaux ont directement accès pour s'abreuver. On peut résoudre le problème par une bonne pratique d'élevage et la construction de

Figure 23 Diminution de la capacité de stockage de l'eau par suite d'envasement de deux réservoirs : a) un petit réservoir en Tanzanie; b) un grand réservoir en Egypte

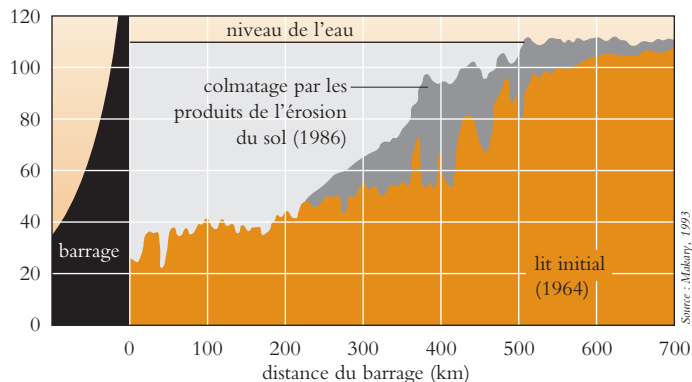
a) réservoir de Msalatu, Tanzanie, 1944–1971

▼ niveau de l'eau (m)



b) Haut barrage d'Assouan, Egypte, 1964–1986

▼ niveau de l'eau (m)



**Envasement de réservoirs, Inde
(Narayana et Babu, 1983)**

réservoir	bassin versant (1 000 km ²)	taux de sédimentation (hm ³ /100 km ²)	
		prévu	observé
Hirakud	83	2.5	3.6
Tungabhadra	26	4.3	6.6
Mahi	25	1.3	9
Rana Pratap	23	3.6	5.3
Nizamnagar	19	0.3	6.4
Pong	13	4.3	17.3
Pamchet	10	2.5	10.1
Tawa	6	3.6	8.1
Kaulagarh	2	4.3	18.3
Mayurakshi	2	3.6	20.9

points d'eau bien répartis plutôt que par des mesures directes d'aménagement des sols.

Domages découlant d'une mauvaise utilisation des engrais

Lorsque les agriculteurs achètent des engrais, leur intention est de les utiliser d'une manière aussi efficace que possible pour leurs cultures. Toutefois, l'efficacité de l'utilisation de l'azote dépasse rarement 50 pour cent et ce pourcentage est encore plus bas pour le phosphore. Une grande partie de l'azote qui n'est pas récupéré finit dans les eaux souterraines sous forme de nitrate ou dans les terres marécageuses sous forme d'ammoniaque atmosphérique. Contrairement à l'azote, le phosphore est en général adsorbé sur l'argile et les oxydes de fer et se fixe dans le sol sauf lorsque celui-ci en est totalement dénué. Lorsque le phosphore est lessivé de la surface du sol—ou à travers des sols extrêmement sableux—et qu'il se déverse dans des cours d'eau, il peut provoquer des problèmes d'eutrophisation, de prolifération d'algues et d'épuisement de l'oxygène dissout. Cela peut à son tour causer la mort des poissons et autres espèces vivant dans l'eau. La meilleure solution pour faire face aux problèmes dus au lessivage superficiel est de s'assurer que le phosphore que l'on apporte est incorporé dans le sol. Bien qu'on rende souvent les pratiques agricoles responsables de la contamination de l'eau par les phosphates, cette pollution est le plus souvent due aux eaux usées et effluents

industriels qui sont directement déversés dans les cours d'eau.

Quelle que soit la forme d'apport de l'azote, la plus grande partie sera normalement transformée en nitrates—sauf en conditions anaérobiques. Les nitrates se déplacent librement dans le sol et peuvent donc être entraînés dans les eaux souterraines sauf s'ils sont interceptés par les racines des plantes. Un problème peut se poser lorsque la nappe phréatique alimente des sources d'eau potable. L'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) fixe la limite supérieure de concentration d'azote sous forme de nitrates dans l'eau potable à 10 ppm (parties par million), niveau rarement atteint sauf lorsque l'on utilise des quantités excessives d'engrais azotés. Ces niveaux ont rarement été mesurés dans les approvisionnements en eau des zones tropicales et, lorsque cela a été le cas, c'était presque toujours en raison de la contamination de l'eau par les excréments animaux ou les eaux d'égout. Néanmoins, il est important d'utiliser aussi efficacement que possible les engrais azotés pour éviter les risques de contamination et en tirer le meilleur rendement possible. De nombreuses études ont été réalisées pour déterminer les méthodes convenant le mieux aux différentes conditions. On recommande souvent une fumure de fond ou de démarrage faible, suivie par un nouvel apport au moment où la demande des cultures atteint son maximum, de manière à éviter les concentrations dans le sol qui dépassent la capacité d'absorption de l'azote par les cultures. En général, la cause principale de dégradation des sols dans les tropiques est que l'on ne parvient pas à remplacer les éléments nutritifs nécessaires aux cultures—c'est-à-dire que les applications d'engrais sont trop faibles ou nulles, plutôt qu'excessives.

Par contre, lorsque le riz est cultivé sur des terres inondées, il est désormais courant d'utiliser d'importantes quantités d'engrais azotés. Bien qu'il n'y ait pas formation de nitrates, des pertes importantes peuvent se produire sous forme d'ammoniaque libéré dans l'atmosphère. On ne considère pas l'ammoniaque comme un polluant atmosphérique dangereux. En fait, comme il est très soluble, il est probable que la plus grande partie de sa fraction atmosphérique retourne dans le sol sous forme de précipitations, à proximité de son lieu d'origine.

Si l'on permet à la rizière de s'assécher de manière à ce qu'il y ait nitrification, de l'oxyde nitreux—gaz à effet de serre—se forme, bien qu'en faibles quantités. Si, après assèchement et formation de nitrates, le sol est à nouveau inondé, des quantités bien plus importantes d'oxyde nitreux apparaissent en général par

suite d'un processus de dénitrification biologique. Lorsqu'on applique des engrais organiques sur des sols marécageux et qu'un phénomène de décomposition anaérobie se produit, un autre gaz à effet de serre, le méthane, est produit en grandes quantités. Le méthane, comme l'oxyde nitreux, a un effet de serre plusieurs fois supérieur à celui du dioxyde de carbone. De ce fait, sur les terres à riz, les bonnes pratiques d'aménagement des sols devraient éviter les fumures organiques et utiliser :

- les résidus de la récolte de riz pour maintenir la teneur voulue en matière organique;
- des algues bleues, azolla et des branches de légumineuses qui fixent l'azote et viennent ainsi compléter l'apport d'engrais azotés.

L'APPLICATION DES PRINCIPES

Les bonnes pratiques d'aménagement des sols

Les principes de bonne gestion des sols sont universellement applicables. Dans la pratique, l'application de ces principes est assez variable selon les conditions pédologiques, climatiques et autres. La culture itinérante, avec des périodes de jachère suffisamment longues pour permettre une régénération totale de la fertilité du sol, est un système durable. Il est encore utilisé dans chacune des trois zones climatiques examinées ici, mais, du fait que les pressions exercées sur les terres augmentent partout et qu'il s'agit d'un système qui n'est pas économiquement viable, sauf au niveau de subsistance, on ne s'y attardera pas davantage. Il existe plusieurs stades intermédiaires entre la culture itinérante et la culture semi-permanente et permanente. Dans la majorité des cas, la capacité de production du sol se dégrade du fait de la diminution de matière organique, de la détérioration de la structure du sol ou de la baisse des éléments nutritifs.

Systèmes durables dans les tropiques humides

Les cultures pérennes, telles que le palmier à huile, l'hévéa, le cacaoyer, les bananes et le plantain sont pratiquées depuis de nombreuses années dans toutes les régions tropicales humides (Figure 24). Ces cultures assurent une couverture végétale et produisent en général des résidus suffisants pour garder au sol une teneur satisfaisante en matière organique. La reconstitution des éléments nutritifs est nécessaire si l'on veut que le système reste productif. Lorsqu'on utilise des engrais azotés, il faudra parfois corriger l'acidité en ayant recours au chaulage (Figure 25). Le fait de cultiver une légumineuse sous le couvert de la culture pérenne peut apporter aux plantes l'azote dont elles ont besoin et compléter la protection contre l'érosion qu'offre l'étage supérieur des arbres. C'est au cours de la phase initiale d'établissement que le risque d'érosion est le plus grand, et qu'il est en général nécessaire



Figure 24 Cultures intercalaires d'hévéas et d'ananas qui protègent le sol tout en étant rentables (Malaisie).



Figure 25 Résultats de la correction de l'acidité due à une utilisation excessive d'engrais ammoniacaux et de chaux lors d'une expérience sur du maïs (Institut International d'Agriculture Tropicale, Ibadan—Nigéria).

d'utiliser une culture de couverture pour protéger le sol jusqu'à ce que les feuillages des arbres de la culture pérenne se rejoignent.

Le système n'est durable que le temps de sa rentabilité, c'est-à-dire jusqu'au moment où la valeur du produit reste suffisante pour couvrir les coûts des intrants essentiels. Le marché mondial pour nombre de cultures pérennes des régions tropicales humides est limité, ce qui, par contre-coup, limite également les surfaces réservées à ces cultures.

Dans les systèmes de plantes cultivées, les sols dominants des régions tropicales humides sont souvent simples à gérer du point de vue de leurs propriétés physiques. Les agrégats sont relativement stables et le drainage est facile. Cependant, si le drainage est efficace et les précipitations sont abondantes, on constate souvent un lessivage des éléments nutritifs et un niveau élevé d'acidité. La gestion des propriétés chimiques de ces sols est donc extrêmement importante. On a démontré à Yurimaguas, dans les plaines tropicales humides de l'Amazonie tropicale péruvienne (Sanchez *et al.*, 1982) que la productivité peut être maintenue par une bonne gestion des engrais et de la chaux, mais il reste à prouver que de tels systèmes sont rentables.

On combine souvent cultures arbustives et cultures arables comme c'est le cas lorsqu'on associe plantations forestières et production vivrière (système taungya). Ces systèmes peuvent être durables, en fonction de l'aptitude de la culture arbustive à recycler les nutriments, et des effets des arbres sur la matière organique du sol et l'acidité. Leur contribution peut être très importante dans les régions tropicales humides.

Systèmes durables dans les régions tropicales subhumides

Dans les régions les plus humides des tropiques subhumides, les plantations pérennes ont parfois été viables, en général lorsqu'il s'agissait de café ou de thé, et à des altitudes modérées où le risque d'érosion n'est pas trop fort. Les cultures ont posé des difficultés considérables de gestion durable des sols. Si l'état chimique des sols est habituellement meilleur dans les zones plus humides, les sols dominants sont en général faiblement structurés et donc très exposés au risque d'érosion. Les systèmes de culture itinérante à jachère longue étaient viables mais se détérioraient lorsque la durée des jachères diminuait et que les périodes de culture augmentaient sous l'effet des pressions démographiques. Ces changements ont entraîné une diminution de matière organique et

une dégradation de la structure des sols causant à leur tour érosion et problèmes dérivés. L'agroforesterie est la meilleure solution pour l'application d'un système durable (Nair, 1989; Young, 1989) mais exige que les arbres choisis soient rentables.

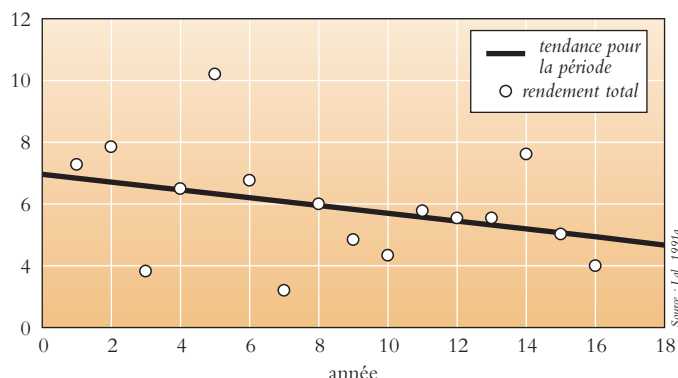
La culture en couloirs, dans laquelle des rangées d'arbres sont plantées le long de la courbe de niveau, avec les cultures au milieu, est vivement encouragée en tant que système durable pour les régions tropicales subhumides. Dans un système modèle, on plante des rangées de légumineuses à croissance rapide, telles que *Leucaena leucocephala* et du maïs et des pois chiches entre les rangées. Les branches des arbres sont utilisées comme paillis pour protéger le sol et fournir de l'azote. Si l'on veut obtenir de bons rendements, il faut utiliser du phosphore et peut-être d'autres engrais, y compris un complément d'azote. Bien qu'on ne puisse éviter la concurrence entre les arbres et les cultures pour l'eau et les éléments nutritifs, les arbres offrent également un potentiel économique. En effet, si l'on veut que ce système soit diffusé plus largement qu'il ne l'est actuellement, il est important de tenir compte de la rentabilité des arbres en plus du rôle qu'ils jouent pour lutter contre l'érosion et accroître la fertilité du sol. Les pratiques locales en matière d'agroforesterie semblent offrir un meilleur point de départ pour des systèmes d'exploitation agricole durable dans les tropiques semi-arides que la culture en bandes, sauf sur les grandes exploitations où les rangées sont suffisamment larges pour permettre la culture mécanisée. Les exploitations de taille moins grande ne peuvent en général se passer de la surface occupée par les arbres, sauf si ceux-ci sont rentables à court terme et contribuent à long terme à empêcher la dégradation du sol.

Dans la perspective du maintien de la productivité, le système de culture continue sans préparation du sol, qui utilise une litière végétale et des engrais pour maintenir le niveau des éléments nutritifs, est certainement supérieur à celui basé sur la préparation du sol avec labour (Figure 26). Bien que les données dont on dispose montrent que les rendements baissent lorsqu'il n'y a pas de préparation du sol, cette baisse est plus lente qu'avec un travail de labour. Il apparaît aussi qu'au bout de quelques années, une interruption dans la culture peut régénérer la productivité du sol. On ne sait pas précisément pourquoi cette interruption est nécessaire, si ce n'est peut-être pour des raisons phytosanitaires. Pour que le système dans son ensemble soit durable, il faut que la culture de 'jachère' apporte un bénéfice économique, et dans ce cas des cultures fourragères

Figure 26 Rendement du maïs sans préparation du sol et avec labour pendant 17 années consécutives (34 saisons de croissance) sur un Luvisol dans l'ouest du Nigéria. Les rendements sont exprimés en t/ha/an comme total cumulatif de deux saisons par an.

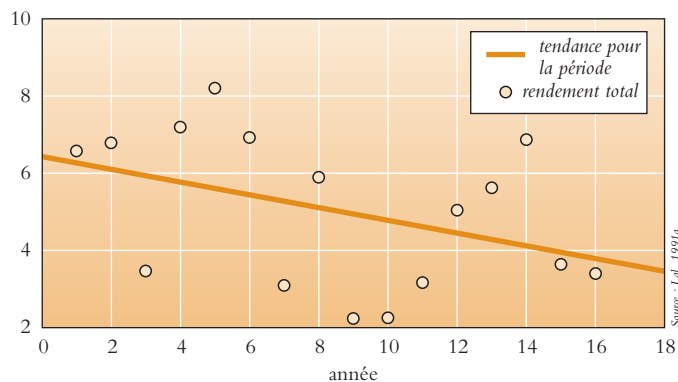
a) pas de préparation du sol

▼ rendement (t/ha)



b) système avec labour

▼ rendement (t/ha)



à base de légumineuses pourraient constituer la solution la meilleure à condition que l'élevage soit praticable d'une manière rentable.

Systèmes durables dans les tropiques semi-arides

Les incertitudes liées aux précipitations et la longueur de la saison sèche peuvent compromettre la durabilité des cultures dans les régions tropicales semi-arides. C'est l'élevage, et non la production végétale, qui offre les meilleures perspectives de durabilité, à la condition—non négligeable—que la charge par unité de surface reste inférieure à la capacité de charge du parcours. Cela garantit le maintien de la végétation et de la couverture végétale qui est essentielle. Dans la plus grande partie des régions tropicales semi-arides, la demande en vivres est telle

que la charge par unité de surface dépasse souvent le seuil viable et que les cultures arables continuent d'empiéter sur les zones traditionnelles de pâturage. Les pratiques culturales se fondent sur des systèmes de culture itinérante dans lesquels la restitution de la fertilité dépend de la repousse des herbages naturels. La restauration de la fertilité des sols est souvent limitée. Cela entraîne une baisse de la productivité, qui est parfois partiellement freinée par l'introduction d'engrais venant compléter l'épandage de fumier. Dans certains cas, des variétés à cycle court, telles que le sorgho, ont contribué à atténuer les pénuries d'eau en réduisant la période durant laquelle la culture prélève de l'eau. La demande en éléments nutritifs n'est pas moins forte pour autant. Les légumineuses nécessitent presque constamment un niveau satisfaisant de phosphore de sorte qu'il faut en général leur appliquer des engrais phosphorés.

Pour maintenir la capacité productive de la terre dans les régions tropicales semi-arides, il faut un système de culture qui permette une régénération de la fertilité du sol (avec une culture de récupération) bien plus rapide qu'elle ne l'est avec des herbages naturels. Malheureusement, après de nombreuses années d'expérience, on a constaté que l'association de graminées et de légumineuses ne convenait à l'amélioration du sol et au pâturage qu'en de rares secteurs. Il faut citer à cet égard le système mis au point en Australie pour les régions tropicales semi-arides du Queensland.

Systèmes durables pour les terres humides

Les systèmes d'exploitation agricoles fondés sur la riziculture dans les terres humides sont le parfait exemple d'un système durable, et ce pour les raisons suivantes :

- les éléments nutritifs sont entraînés dans le sol et non lessivés;
- l'approvisionnement en eau est normalement assuré par l'irrigation et par la construction de diguettes de retenue;
- l'érosion n'est pas un problème du fait que les diguettes empêchent le ruissellement et que l'eau qui reste en surface atténue l'impact des gouttes de pluie sur le sol;
- l'acidité n'est pas un problème car les sols inondés sont toujours proches de la quasi-neutralité de l'eau des crues;
- la fixation de l'azote dans le système inondé est relativement élevée;
- la teneur en phosphate des sols inondés est relativement élevée car le fer est présent sous forme ferreuse plutôt que ferrique;

- le problème des adventices est moins aigu dans les zones inondées qu'en terrain sec.

Il n'est donc pas surprenant que les systèmes de production rizicole existent depuis des milliers d'années dans certaines parties de l'Asie et que dans de nombreuses régions leur productivité continue d'augmenter (Figure 27). Les augmentations les plus fortes ont été enregistrées lorsque la culture de riz est pratiquée avec une irrigation parfaitement maîtrisée et les applications requises d'engrais. Bien qu'on ait vivement encouragé l'emploi pour la riziculture d'engrais organiques, y compris les engrais verts, l'utilisation effective a diminué considérablement à mesure que les rendements rizicoles et la consommation d'engrais azotés augmentaient. Comme on l'indique ci-dessus, la plupart des avantages découlant d'une augmentation de la teneur en matière organique du sol ne s'appliquent pas dans le cas de la production rizicole. Elle peut même être nuisible par suite de la formation de sous-produits phytotoxiques dus à la décomposition de matière organique fraîche dans le sol dans des conditions anaérobies. En outre, le fait de réduire l'utilisation des engrais organiques pour le

Figure 27 Rendements rizicoles dans différents pays (1961–1991)

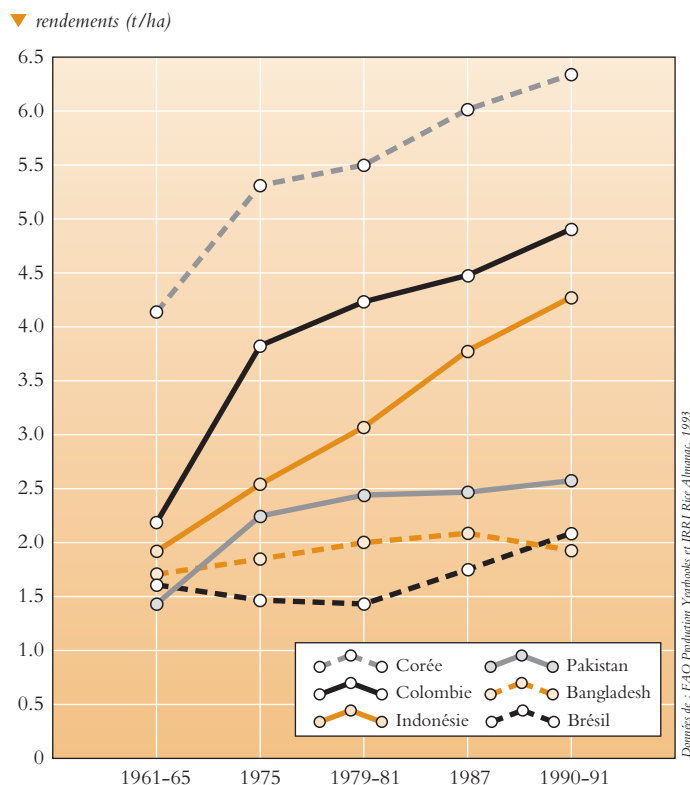


Figure 28 Mesure de l'ammoniac atmosphérique provenant des engrais azotés appliqués au riz à l'Institut International de Recherche sur le Riz, Los Baños (Philippines).

riz freine l'évolution du méthane, gaz à effet de serre très actif.

Pour obtenir des rendements rizicoles élevés, il faut un apport important d'engrais azotés (de l'ordre de 50 à 100 kgN par culture). Cela n'entraînera pas de pollution des eaux souterraines par le nitrate puisque celui-ci ne se forme pas dans les conditions inondées des terres à riz. L'inefficacité des applications d'engrais azotés est essentiellement due aux pertes d'ammoniac (Figure 28). On peut en grande partie les éviter en incorporant au sol une fumure basale avant le repiquage et en retardant la deuxième application jusqu'à ce que la culture soit bien démarrée de manière à ce que la libération d'ammoniac dans l'atmosphère soit freinée par la lenteur de la circulation de l'air à la surface de l'eau.

Le plus grand danger pour la viabilité durable de la production rizicole irriguée provient du système d'approvisionnement en eau. Les principaux problèmes ont trait à la mauvaise gestion des sols dans les bassins hydrographiques des barrages alimentant les périmètres d'irrigation. L'érosion du sol peut, d'une part, réduire la capacité de stockage du barrage et, d'autre part, obstruer les canaux de distribution. Lorsque les eaux phréatiques sont salines dans la zone desservie par le barrage, la remontée des nappes souterraines risque de saliniser la zone racinaire des plantes et d'entraîner une baisse des rendements—phénomène qui semble avoir été à l'origine de la stagnation et de la diminution des rendements dans une grande partie des régions sèches du sous-continent indien. Une mauvaise gestion de l'approvisionnement

en eau peut se traduire par un apport d'eau excessif en amont du système de distribution, et des sécheresses en aval. L'eau du barrage devenant moins abondante, des pénuries occasionnelles peuvent se produire dans tout le périmètre desservi, avec des effets catastrophiques pour les rendements.

Là où le système d'irrigation est basé sur la dérivation des cours d'eau ou sur les crues naturelles (c'est-à-dire irrigation pluviale en opposition avec l'irrigation contrôlée), la gestion de la riziculture est plus difficile et le facteur risque est tel que les agriculteurs ne sont pas toujours prêts à investir dans l'achat d'engrais. C'est pour cette raison que les rendements rizicoles n'ont pas autant augmenté dans ces régions que dans celles faisant l'objet d'une irrigation contrôlée. Les régions pluviales représentent près de la moitié de la superficie rizicole totale et, sur la plus grande partie d'entre elles, une culture de montagne est pratiquée après la récolte de riz. Cela pose des difficultés supplémentaires du fait qu'il faut créer les conditions convenant à la culture du blé ou d'une légumineuse sur un sol précédemment mis en boue pour le riz. De nombreuses recherches restent à faire pour rendre ces systèmes plus productifs.

LA NECESSITE D'AGIR

Tirer parti des connaissances actuelles pour construire un avenir durable

On a acquis de nombreuses connaissances sur les sols, leur distribution et leur aménagement (voir encadré page suivante). Les principes biophysiques sur lesquels doit se fonder un aménagement durable du sol sont désormais bien connus. Malgré cela, nous avons vu que les systèmes d'aménagement durable ne sont pas suffisamment diffusés dans les régions qui en ont le plus besoin. Cela signifie que non seulement les agriculteurs des zones défavorisées ont du mal à assurer leur subsistance mais que cette situation risque de devenir de plus en plus difficile à mesure que les sols se dégradent davantage et que l'approvisionnement en eau est plus aléatoire.

On dispose des bases nécessaires pour remédier à cette situation grâce aux connaissances et à la compréhension actuelles des systèmes de production agricole. Il faut maintenant procéder à une évaluation de la manière dont les principes d'aménagement durable des sols sont ou doivent être appliqués dans les régions où la productivité agricole est en stagnation ou en baisse. Cette évaluation doit être faite compte tenu de la grande diversité des conditions biophysiques et socio-économiques dans ces régions. L'adoption de systèmes durables nécessite l'utilisation d'engrais et autres facteurs de production, y compris l'utilisation d'engrais organiques et le recyclage des éléments nutritifs provenant des résidus. Ces systèmes à faible apport d'intrants et de recyclage impliquent souvent un recyclage similaires des conditions mêmes de la pauvreté. L'objectif doit être d'échapper au piège de cette pauvreté, et, bien qu'il faille probablement pour cela recourir aux intrants économiques appropriés, il n'y a pas de raison pour qu'on ne puisse pas le faire dans le cadre d'un système durable. A mesure que les pressions démographiques se feront plus fortes, les problèmes deviendront plus difficiles à résoudre, et des mesures doivent être prises sans tarder pour mettre un terme à la dégradation des terres et établir des systèmes durables dans les régions où sont actuellement utilisées des méthodes d'exploitation agricole non durable. Beaucoup reste à faire pour évaluer la viabilité des systèmes de gestion des sols et des terres dans des



Figure 29 Recherche appliquée en matière d'aménagement des terres; site de Luodian (Chine) où l'IBSRAM et des scientifiques nationaux collaborent à la réalisation d'études sur l'amélioration des pratiques d'aménagement des sols.

environnements différents, et pour élaborer des politiques et mesures d'incitation garantissant que ces systèmes soient socialement acceptables et économiquement attrayants.

La principale responsabilité dans l'action incombera aux gouvernements nationaux et aux services de l'agriculture. Ceux-ci devront bénéficier de l'appui sans réserve des organisations internationales et, bien sûr, des communautés agricoles et scientifiques. Parmi les organismes internationaux, la FAO continuera de jouer un rôle de chef de file, avec l'appui de diverses organisations telles que l'International Board for Soil Research and Management (IBSRAM). L'IBSRAM apporte déjà son soutien à plusieurs programmes nationaux par le biais de divers réseaux qui réalisent des études sur l'application des techniques d'aménagement des sols dans les régions à problèmes (Figure 29). Une aide en matière de recherche stratégique devra être apportée aux universités et à d'autres organismes, notamment :

- les centres internationaux de recherche agricole bénéficiant d'un appui du Groupe Consultatif pour la Recherche Agricole Internationale (GCRAI);
- le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE);
- ceux qui étudient les changements climatiques mondiaux et leurs effets sur l'agriculture;
- d'autres organismes, y compris des organisations non gouvernementales.

La durabilité ne repose pas seulement sur des solutions biophysiques efficaces. Il faut aussi que ces solutions soient économiquement viables et socialement acceptables. Il est donc essentiel que les études appliquées et recherches appropriées nécessaires pour identifier des techniques biophysiques efficaces soient réalisées en complémentarité avec des études socio-économiques reflétant les préoccupations des agriculteurs. Les facteurs sociaux et économiques devront être pris en

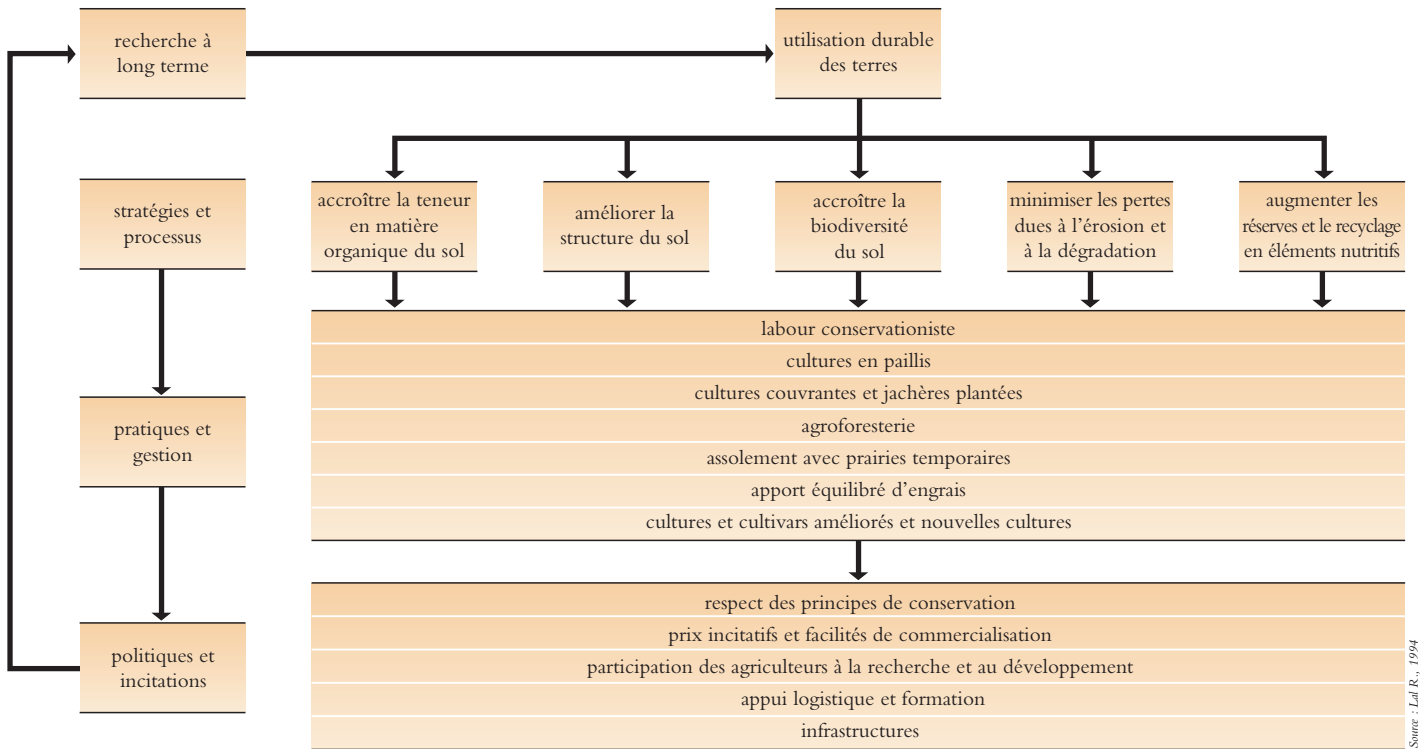
Eléments de systèmes durable d'aménagement des sols

<i>zones tropicales humides</i>	<i>zones tropicales subhumides</i>	<i>zones tropicales semi-arides</i>	<i>terres hydromorphes</i>
<p>arbres pour éviter l'érosion pour recycler les éléments nutritifs</p> <p>pour le paillis : afin de maintenir les matières organiques pour supprimer les adventices</p> <p>engrais pour accroître les rendements pour remplacer les éléments nutritifs</p> <p>chaulage pour contrôler l'acidité pour remplacer Ca (et Mg)</p> <p>cultures de relais et cultures intercalaires pour minimiser l'exposition des sols pour lutter contre l'érosion</p> <p>construction de terrasses et diguettes en courbes de niveau pour lutter contre l'érosion pour éliminer l'eau excédentaire</p>	<p>arbres pour éviter l'érosion pour recycler les éléments nutritifs</p> <p>pour le paillis : afin de maintenir les matières organiques pour supprimer les adventices</p> <p>engrais pour accroître les rendements pour remplacer les éléments nutritifs</p> <p>chaulage pour contrôler l'acidité pour remplacer Ca (et Mg)</p> <p>engrais verts pour fournir de l'azote pour maintenir les matières organiques pour minimiser l'exposition du sol</p> <p>construction de diguettes suivant les courbes de niveau pour lutter contre l'érosion pour éliminer l'eau excédentaire</p>	<p>animaux pour transférer les éléments nutritifs pour fournir du fumier</p> <p>engrais pour accroître les rendements pour remplacer les éléments nutritifs</p> <p>bandes, haies ou diguettes en courbes de niveau pour lutter contre l'érosion pour produire du fourrage pour animaux</p> <p>planches en billons pour maîtriser l'eau sur les sols argileux lourds</p> <p>arbres coupe-vent pour lutter contre l'érosion éolienne</p> <p>irrigation et drainage comme appoint aux précipitations pour éviter la salinité et l'engorgement</p>	<p>construction de terrasses ou de diguettes pour retenir l'eau</p> <p>mise en boue pour minimiser le drainage pour lutter contre les adventices</p> <p>Irrigation comme appoint aux précipitations et aux eaux des crues</p> <p>engrais pour accroître les rendements pour remplacer les éléments nutritifs</p> <p>drainage de surface pour éliminer l'eau excédentaire</p>

Exemples de systèmes d'aménagement des sols durables

<i>zones tropicales humides</i>	<i>zones tropicales subhumides</i>	<i>zones tropicales semi-arides</i>	<i>terrains marécageux</i>
<p>plantations avec couverture de légumineuses</p> <p>cultures itinérantes à longue jachère</p>	<p>systèmes d'agroforesterie dans lesquels les arbres sont d'une bonne rentabilité</p> <p>système de paillis sans préparation du sol avec apport d'engrais et chaulage comme une source économique de matière organique</p>	<p>pâturages amendés avec pâture contrôlée, soit en continu soit en alternance avec des cultures</p>	<p>riziculture inondée avec approvisionnement en eau et amendement contrôlés</p>

Figure 30 Processus, pratiques et politiques liés à l'utilisation des terres et à la résilience des sols



Source : Lal R., 1994

considération lorsqu'on adapte des méthodes connues de bonne gestion des sols à des situations locales particulières. De même, lorsque l'adaptation appelle des réformes de politique, les décideurs doivent être tenus informés des incidences sociales et économiques afin de pouvoir définir la réorientation appropriée (Figure 30).

Il est très rare de réaliser la durabilité gratuitement. La plupart des sociétés dans le monde développé ont financé le développement agricole d'une façon ou d'une autre, que ce soit par des subventions directes pour les engrais, le chaulage, l'irrigation, le drainage et la lutte contre l'érosion ou, indirectement, par des systèmes de soutien des prix des productions ou d'investissement dans la recherche scientifique et technique. La viabilité actuelle de nombreux systèmes de riziculture irriguée doit beaucoup aux investissements qui ont été faits (en temps et en travail plutôt qu'en espèces) pour la mise au point de systèmes de maîtrise et de distribution de l'eau. Actuellement, il faut reconnaître que ces systèmes sont menacés—que ce soit par l'érosion dans les bassins versants des

réservoirs ou, dans les régions plus sèches, par la salinisation dans les zones desservies. Il se pourrait que des investissements beaucoup plus importants soient nécessaires pour que ces systèmes restent durables.

Il faut aussi admettre que dans la plupart des régions tropicales les systèmes actuels d'exploitation agricole et d'aménagement des sols ne sont pas durables. De nombreuses expériences ont été menées qui montrent que la production à long terme des terres arables dans les régions humides et semi arides des tropiques n'est possible que si l'on maintient la teneur du sol en matière organique. Cela a été difficile à réaliser même dans le cadre d'expériences artificiellement entreprises et réussies dans les stations de recherche. Si la baisse inhérente de la fertilité du sol n'entraîne pas toujours une diminution des rendements parce qu'on utilise plus de moyens et de ressources, la rentabilité unitaire des intrants aura toujours tendance à diminuer de sorte que le système ne sera plus viable économiquement.

La plupart des systèmes durables autochtones nécessitent le maintien de la teneur en matière organique et ne sont viables que

tant que les terres restent abondantes. Les principales sources de matière organique sont les arbres et les pâturages. Pour que ces sources soient économiquement accessibles au petit agriculteur, des changements de politique générale seront peut-être nécessaires.

Les questions écologiques de portée plus vaste et les problèmes à long terme que pose la dégradation des ressources ne peuvent être laissés à la seule appréciation des agriculteurs mais sont aussi la responsabilité des gouvernements. L'importance de ces problèmes exige à présent qu'une action d'urgence soit entreprise tant au niveau national qu'international pour parvenir à une production durable et suffisante et mettre un terme à la dégradation des terres.

Deux milliards de personnes supplémentaires vivront dans les régions tropicales du monde dans moins de 25 ans. Si l'on veut assurer leur subsistance, une augmentation massive de la productivité du potentiel de base des ressources en terres sera nécessaire. Actuellement, la productivité a tendance à diminuer plutôt qu'à augmenter. Un effort supplémentaire considérable est requis pour appliquer les connaissances et techniques existantes à une meilleure gestion des ressources en sol et en eau et rechercher de nouvelles technologies partout où les connaissances actuelles s'avèrent inappropriées.

Bibliographie

FAO. 1977. Dark Clay Soils of Tropical and Subtropical Regions, Dudal, R. et Bramao, D.L. (édit). *Agric. Development Paper* no. 83.

FAO. 1977. Organic Materials and Soil Productivity. *Bulletin pédologique* no. 35.

FAO. 1983. Garder la terre en vie: l'érosion des sols—ses causes et ses remèdes, *Bulletin pédologique* no. 50.

FAO. 1989. Conservation des sols et des eaux, façons culturales appropriées, *Bulletin pédologique* no. 54.

FAO. 1989 Evaluation des terres pour l'agriculture irriguée: directives, *Bulletin pédologique* no. 55.

FAO. 1988. La qualité de l'eau en agriculture, *Bulletin d'irrigation et de drainage* no. 29 Rev.

FAO. 1990. Conservation des sols et des eaux dans les zones semi-arides, *Bulletin pédologique* no. 57.

FAO. 1989. Salt-affected Soils and their Management, *Bulletin pédologique* no. 39.

FAO. 1989. Soil Conservation for Small Farmers in the Humid Tropics. *Bulletin pédologique* no. 60.

FAO. 1990. Management of Gypsiferous Soils. *Bulletin pédologique* no. 62.

FAO. 1991. Conférence FAO/Pays-Bas sur l'agriculture et l'environnement: stratégies et instruments pour une agriculture et un développement rural durables.

FAO. 1992. The Use of Saline Water for Crop Production, *Bulletin d'irrigation et de drainage* no. 48.

FAO. 1993a. Agriculture: Horizon 2010.

FAO. 1993b. FESLM: An International Framework for Evaluating Sustainable Land Management. *World Soil Resources Report* 73.

FAO. 1993c. Soil Tillage in Africa: Needs and Challenges. *Bulletin pédologique* no. 69.

FAO. 1994. Introduction à le gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin pédologique* no. 70.

Greenland, D.J. 1974. Evolution and Development of Different Types of Shifting Cultivation, FAO (1974) L'agriculture itinérante et la conservation des sols en Afrique, *Bulletin pédologique* no. 24.

Greenland, D.J. 1994. Long-term cropping experiments in developing countries: the need, the history and future, dans Leigh, R.A. et Johnston, A.E. (édit), *Long-term Experiments in Agricultural and Ecological Sciences*. CAB-International, Wallingford, RU.

Greenland, D.J. et Lal, R. (édit) 1977. *Soil Conservation and Management in the Humid Tropics*. Wiley, Chichester, RU.

Greenland, D.J. et Szabolcs, I. (édit) 1994. *Soil Resilience and Sustainable Land Use*. CAB International, Wallingford, RU.

Hillel, D. 1991. *Out of the Earth: Civilisation and the Life of the Soil*. University of California Press, Berkeley, Californie.

IBSRAM. 1987. Management of Acid Tropical Soils for Sustainable Agriculture. *Proceedings* no. 2.

- IBSRAM. 1987. Tropical Land Clearing for Sustainable Agriculture. *Proceedings no. 3*.
- IBSRAM. 1987. Management of Vertisols under Semi-arid Conditions. *Proceedings No. 6*.
- IBSRAM. 1990. Organic Matter Management and Tillage in Humid and Subhumid Africa. *Proceedings no. 10*.
- IBSRAM. 1991. Evaluation for Sustainable Land Management and Tillage in Humid and Subhumid Africa. *Proceedings no. 12*.
- IBSRAM. 1991. Soil Management for Sustainable Rice Production in the Tropics. *Monograph no. 2*.
- India National Bureau of Soil Survey and Land Use Planning. 1991. *The Suitabilities of Vertisols and Associated Soils for Improved Cropping Systems in Central India*. NBSS.
- Jenkinson, D.S. 1991. The Rothamsted Long-Term Experiments: Are They Still of Use? *Agronomy Journal*, 83, pp. 2-10.
- Jenkinson, D.S. 1993. Continuity in Agricultural Research—Benefits for Today and Lessons for the Future. *The Massey Ferguson National Agricultural Lecture, 1993*.
- Kwakye, P.K., Dennis, E.A. et Asmah, A.E. (sous presse) Management of a Continuously Cropped Soil through Fertilizer Use. *Experimental Agriculture*.
- Lal, R. 1991a. Tillage and Agricultural Sustainability. *Soil and Tillage Research*, 20, pp. 133-146.
- Lal, R. 1991b. *Tropical Agricultural Hydrology and the Sustainability of Agricultural Systems*. IITA et Ohio State University, Columbus, Ohio.
- Lal, R. 1994. *Sustainable Land Use Systems and Soil Resilience*, dans Greenland, D.J. et Szabolcs, I. (édit), *Soil Resilience and Sustainable Land Use*, pp. 41-67. CAB-International, Wallingford, RU.
- Lal, R., Hall, G.F. and Miller, F.P. 1989. Soil degradation: I. Basic Processes. *Land Degradation and Rehabilitation*, 1, pp. 51-69.
- Makary, A.Z. 1993. Sedimentation Front Progress in the High Aswan Dam Reservoir, *Proceedings International Conference on Development of the Nile and Other Major Rivers*, 2, 9/10-1 au 9/10-15. Nile Research Institute, Delta barrages, Egypt. Cité par: Shahin, M.M.A. (1993), An Overview of Reservoir Sedimentation in Some African River basins, dans *Sediment Problems: Strategies for Monitoring, Prediction and Control*, pp. 93-100. IAHS Publication no. 217.
- McCown, R.L. et Jones, R.K. 1992. Agriculture of Semi-Arid Eastern Kenya: Problems and Possibilities, dans Probert M. (édit), *A Search for a Strategy for Sustainable Dryland-Cropping in Semi-arid Eastern Kenya*, pp. 8-15. ACIAR, Canberra.
- Nair, P.K. 1989. *Agroforestry Systems in the Tropics*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht et ICRAF, Nairobi.
- National Research Council. 1993. *Vetiver Grass: A Thin Green Line Against Erosion*. National Academy Press, Washington DC.
- Narayana, V. et Babu, R. 1983. Estimation of Soil Erosion in India, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 109, pp. 419-434. Cité par: Randhawa, N.S. et Abrol, I.P. (1990), Sustaining Agriculture: the Indian Scene, dans: Edwards, C.A., Lal, R., Madden, P., Miller, R.H. et House, G. (édit), *Sustainable Agricultural Systems*, pp. 438-450. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa.
- Nye, P.H. et Greenland, D.J. 1960. *The Soil Under Shifting Cultivation*. CAB-International, Wallingford, RU.
- Oldeman, L.R. 1994. The Global extent of Soil Degradation, dans Greenland, D.J. et Szabolcs, I. (édit), *Soil Resilience and Sustainable Land Use*, pp. 99-118. CAB-International, Wallingford, RU.
- Oldeman, L.R., Hakkeling, R.T.A. et Sombroek, W.G. 1991. *World Map on the Status of Human Induced Soil Degradation (Revised Edition)*. ISRIC et PNUE, Nairobi.
- Pichot, J., Sedogo, M.P., Poulain, J.F. et Arrivets, J. 1981. Evolution de la fertilité d'un sol ferrugineux tropical sous l'influence de fumures minérales et organiques, *Agronomie Tropicale*, 36, pp. 122-133.
- Pieri, C.J.M.G. 1992. *Fertility of Soils: A Future for Farming in West Africa*. Springer Verlag, Berlin.
- Rapp, A.L., Berry, L. et Temple, P. 1972. Erosion and Sedimentation in Tanzania. *Geografiska Annaler*, 54 A, nos. 1 et 2.
- Robison, D.M. et McKean, S.J. 1992. *Shifting Cultivation and Alternatives: an Annotated Bibliography, 1972-1989*. CIAT and CAB-International, Wallingford, RU.
- Ruthenberg, H. 1976. *Farming Systems in the Tropics*. Oxford University Press, Londres, RU.
- Sanchez, P.A., Bandy, D.E., Vilchica, J.H. et Nicholaides, J.J. 1982. Amazon Basin Soils: Management for Continuous Crop Production. *Science*, 216, pp. 821-827.
- Syners, K. et Rimmer, D. (édit) 1988. *Vertisols: Their Distribution, Properties, Classification and Management*. SMSS Texas A & M University Tech. Monograph No. 18, 193 pp.
- Young, A. 1989. *Agroforestry for Soil Conservation*. CAB-International, Wallingford, RU.

*Pour obtenir des conseils techniques sur
les problèmes et programmes d'aménagement des sols,
veuillez écrire à l'adresse suivante:*

Division de la mise en valeur des terres et des eaux

Département de l'agriculture

Organisation des Nations Unies pour
l'alimentation et l'agriculture

Viale delle Terme di Caracalla

00100 Rome

Italie

