

Alain RUELLAN

Des sols et des hommes

Un lien menacé



Préface
Bruno LATOUR

Des sols et des hommes
Un lien menacé

Des sols et des hommes

Un lien menacé

Alain RUELLAN

IRD Éditions
INSTITUT DE RECHERCHE
POUR LE DÉVELOPPEMENT

Marseille, 2010

Photos de couverture
IRD Base Indigo – Alain Ruellan

Sauf mention particulière, les photos de cet ouvrage sont de Alain Ruellan.

Préparation éditoriale et coordination

Corinne Lavagne

Mise en page

Aline Lugand – Gris Souris

Maquette de couverture

Michelle Saint-Léger

Maquette intérieure

Gris Souris

La loi du 1er juillet 1992 (code de la propriété intellectuelle, première partie) n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans le but d'exemple ou d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1er de l'article L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon passible des peines prévues au titre III de la loi précitée.

© IRD, 2010

ISBN : 978-2-7099-1690-5

Remerciements

La réalisation de ce livre a été possible grâce à la collaboration généreuse de nombreux collègues, pédologues, grands voyageurs, pour la plupart chercheurs de l'IRD, qui ont bien voulu me confier quelques-unes de leurs plus belles images, commentées, de paysages et de sols du monde. Qu'ils en soient vivement remerciés.

Un grand merci aussi aux Éditions de l'IRD, dont la double exigence de clarté pédagogique et de qualité iconographique m'a permis d'affiner mes propres choix scientifiques et éducatifs. Merci, tout particulièrement, à Corinne Lavagne qui a joué un rôle déterminant tout au long du processus de construction, de rédaction et d'édition de ce livre.

Merci à Planète Terre (Année internationale des géosciences au service de l'humanité) qui a donné son label à l'ouvrage, ainsi qu'à l'AFES, Association Française pour l'Étude du Sol, pour son appui à la réalisation de ce livre ; les présidents de l'AFES, Roland Poss puis Jean-Paul Legros, ont été de précieux conseillers.

Merci enfin à Bruno Latour, auteur de la préface de ce livre. La pédologie et ses artisans figurent depuis longtemps parmi ses préoccupations de sociologue des sciences. Son regard et ses analyses, exprimés dans la préface, sont précieux et encourageants.

Alain RUELLAN

Sommaire

Préface	9	Diversité des sols dans le monde	35
Introduction		La géographie des sols en fonction des climats	35
Le sol : un milieu à découvrir pour mieux construire l'avenir de la planète	11	Les sols des régions équatoriales et tropicales humides	35
Chapitre 1 – Le sol : un milieu original	15	Les sols des régions tropicales moins humides, à saison sèche accentuée	36
Le sol, c'est-à-dire ?	17	Les sols des régions à climat méditerranéen	37
Un milieu naturel et caché	17	Les sols des régions désertiques	38
Diversité des sols	18	Les sols des régions à climat tempéré océanique	39
Regarder le sol	18	Les sols des régions à climat continental froid en hiver	40
Le sol, un milieu dynamique	19	Les sols des régions polaires	40
Les sols interagissent avec les milieux	20	Dans les régions de haute montagne	41
La morphologie des sols	20	La géographie des sols en fonction de celle des roches-mères	41
Décrire pour comprendre la couverture pédologique et ses horizons	22	Ferralsols et Nitisols en milieu tropical	41
Les horizons pédologiques	22	En régions tempérées et méditerranéennes, forte influence du calcaire	42
Les couleurs pédologiques	22	Sur matériaux volcaniques	42
Les structures en agrégats	23	La géographie des sols en fonction des reliefs	43
Les vides	23	La géographie des sols en fonction du temps	44
Les traits pédologiques	25	Les « célébrités » pédologiques	45
Histoire et fonctionnement des sols	26	Chapitre 3 – Le sol et ses fonctions	53
Regarder le profil	26	Le sol accueille la vie	55
Sortir du trou	26	La vie fabrique les sols	55
Chapitre 2 – Promenades parmi les sols	29	Les matières organiques contribuent à la formation des sols	56
Les sols : tous pareils mais tous différents	31	Les sols offrent à la vie un accueil diversifié	57
Les mécanismes de genèse et d'évolution des sols	32	Les sols contribuent aux cycles de l'eau et de l'atmosphère	57
Les mécanismes de transformation des roches et de leurs constituants	33	Les sols dépollueurs et pollués	58
Les mécanismes biologiques et d'accumulation de matières organiques	33	Les sols fournissent aux hommes nombre de matériaux essentiels	58
Les mécanismes de migration et d'accumulation des particules et des éléments généérés par l'altération	33	La diversité des matériaux d'origine pédologique	58
Les mécanismes d'arrangements et d'agrégation des constituants	33	Les sols, archives du passé de l'homme et des écosystèmes	64
		Histoire des sols et des écosystèmes	64
		Histoire des hommes	64
		Sols et culture, sols et religions	65
		Les sols contribuent à l'élaboration permanente des reliefs	65

Chapitre 4 – Les sols en danger	69	L’alliance des hommes avec les sols	90
Hommes et sols : des relations vitales mais conflictuelles	71	Que faire ?	90
Un fait inquiétant :		Bien connaître les sols	90
aujourd’hui, la destruction des sols va plus vite que leur construction	73	Améliorer les fonctionnements des sols déjà utilisés	91
Tous les sols sont modifiés par l’homme	74	Favoriser le « confort morphologique » nécessaire à la vie dans les sols	91
Quand l’homme prend soin des sols, il les améliore	74	Mieux gérer l’irrigation	92
Quand l’homme force les sols, il les abîme	75	Limiter les dégradations	93
Quelles conséquences sur l’ensemble de la Terre ?	80	Augmenter les surfaces cultivées	94
Chapitre 5 – Mieux utiliser les sols	83	Quelques autres soucis majeurs	98
Les difficiles relations entre les sols et les hommes	85	L’avenir est affaire de tous et de chacun	100
Nourrir 9 milliards d’hommes	85	La Terre est connue... le sol doit l’être	100
Assurer à tous un accès à une eau douce non polluée	86		
Fournir à chacun l’énergie renouvelable dont il a besoin	88	Bibliographie	101
Freiner les changements climatiques	88	Glossaire	103
Gérer les déchets	89		

Préface

Savoirs et sagesse des sols

Nous sommes tous redevenus des paysans ! Au moment même où les meilleurs esprits se lamentent sur la fin des campagnes, jamais les humains, les urbains – ou, pour leur redonner leur nom véritable, les Terriens – ne se sont davantage préoccupés des questions terrestres, des affaires terriennes. Si l'on peut définir un paysan par le fait qu'il dépend pour sa subsistance, et parfois pour son contentement, du climat, du sol, de l'eau et des bêtes, grandes et petites, on peut dire que les Terriens sont redevenus collectivement attentifs à toutes ces questions qu'ils croyaient avoir laissées derrière eux en s'agrégeant aux villes. Pas une journée où il ne faille nous préoccuper de la qualité de la nourriture, du sol, des bêtes, des nuages, de l'eau, de la température ou faire respecter nos droits de propriété. Nous parcourons collectivement notre petit domaine de la planète bleue avec le même sentiment d'anxiété, de plaisir, d'attention et de secrète superstition que nos pères le faisaient, naguère, pour leur lopin de terre. À rebours de la plainte sur la mort des paysans, c'est toute une civilisation, d'un bout à l'autre de la planète, qui redevient sensible, mais à une tout autre échelle qu'autrefois, à la question des sols, oui à « Gé », la vieille déesse, pour ne pas dire à « Gaïa », la divinité nouvelle.

Les humains *sont revenus sur Terre*. Ce qui ne veut pas dire qu'ils « reviennent à la terre » pour redécouvrir ces liens bucoliques que les fictions réactionnaires ou révolutionnaires leur avaient laissé miroiter. S'il est vrai que « la terre ne ment pas », elle peut sûrement tromper : en s'arrachant à leurs villages de « bouseux », ils avaient cru laisser derrière eux la glèbe et la glaise, et voilà qu'ils la retrouvent devant eux. Ils en ont les bottes toutes crottées.

En lisant ce livre, admirablement illustré, fruit de toute une vie donnée à cette science majeure des interfaces qu'on appelle la pédologie, on comprendra à quel point il était illusoire de croire que les urbanisés pourraient un jour « quitter la terre » et « s'affranchir des liens du sol ». Le nouveau sol auquel les Terriens stupéfaits découvrent qu'ils sont si durablement rattachés ne peut se comprendre, bien sûr, sans une nouvelle science. Et qu'elle est belle cette science qui parvient à lier ensemble la géologie (l'indispensable roche-mère, qui est souvent d'ailleurs la roche-fille des anciens sols), la biologie (voilà que les micro-organismes se mettent à proliférer dans la moindre motte de terre, sans oublier les vers de terre, ces bulldozers minuscules de notre planète), mais aussi

l'archéologie, l'histoire, la sociologie, l'urbanisme, puisqu'il n'est pas une *propriété* du sol dont ne dépendent en partie les *propriétaires* des sols. Que de soins les humains portent à leur peau ! Comment pourraient-ils soigner avec la même attention cette fine pellicule d'une folle complexité par laquelle s'établissent les liens de la roche, de l'eau, de la vie, de l'agriculture et de la culture¹ ?

L'historien des sciences se demande toujours, en lisant les pédologues, ce qui se serait passé si l'épistémologie avait pris pour modèle, non pas la mécanique céleste, mais la science des sols. Jamais la science ne se serait éloignée de la Terre. Jamais elle n'aurait été séparée en sciences dures et rigides, d'un côté, et en sciences souples et douces, de l'autre. Jamais surtout elle n'aurait conçu la nature sous la forme si étrange de la *res extensa*, ce cadre vide et partout semblable qui attend que l'action humaine vienne le remplir plus ou moins arbitrairement. Les « plans d'occupation des sols » n'auraient pas omis de s'intéresser aux sols... et l'on aurait, comme le dit l'auteur, des plans d'occupation pédologique des sols.

Lisez ce livre : que de différences, que de plages, de places, de climats, de parages distincts. Que d'horizons multiples (ce beau mot d'horizon qui désigne chez les pédologues les nappes révélées par les tranchées et non pas le ciel et ses lointains). Si le paysan est défini par son *pagus*, alors ce que font les sciences des sols c'est de nous situer, nous aussi, chacun dans un *pagus* différent qu'il faut apprendre à découvrir et, le mot redevient admirable, à *cultiver* avec soin. Le modèle de la mécanique céleste est admirable bien sûr, mais il entraîne la pensée à unifier beaucoup trop vite les matériaux divers qui composent l'univers. Les sciences des sols, parce qu'ils sont, et parce qu'elles sont tellement *composites*, ne peuvent étendre d'un coup, sans discussion, les lois universelles qu'elles sont chargées de découvrir. Elles doivent justement les *composer* peu à peu. Il n'y a que la pédologie pour permettre de lier, sans que cela jure, le beau mot de « composition » avec l'humble pratique du « compost » ! Entre le jardin et la planète, pour reprendre la belle expression de Gilles Clément, il n'y a que la pédologie qui puisse faire le lien.

¹ Voir l'étonnant compendium à la gloire de la science des sols par Edward Landa et Christian Feller (sous la direction de) : *Soil and Culture*, Springer, 2009.

Et c'est pourquoi le sociologue des sciences s'étonne toujours que la science des sols ne soit pas devenue l'une des sciences majeures, parcours obligé des étudiants comme des cultivateurs, des géographes comme des urbanistes ou des juristes. Parce que le sol se situe au croisement de toutes nos actions, on pourrait imaginer que les humains, une fois redevenus des Terriens, en fassent leur médecine et leur philosophie. Ce livre à destination de tous les publics prépare à ce renversement de perspective qui fait de la science le commencement de la sagesse, et de l'attachement à la Terre tout autre chose que ce que les humains « déracinés » avaient imaginé en quittant leurs campagnes. Paysans-savants nous étions, savants-paysans nous serons.

Bruno LATOUR

Sociologue des sciences, Professeur à Sciences Po Paris

Introduction

Le sol, un milieu à découvrir pour mieux construire l'avenir de la planète

À la surface des continents, là où les roches formées dans les profondeurs de l'écorce terrestre prennent contact avec l'air et l'eau, la vie explose en donnant naissance à l'habitat dont elle a besoin pour se développer. Cet habitat, c'est le sol.

Le sol est un milieu délimité. Il provient des roches, décomposées et altérées par l'action de l'eau, de l'air, des organismes vivants. Il est constitué de particules minérales partiellement nutritives, mais aussi de composés organiques, autre source d'aliments en provenance des êtres vivants eux-mêmes. Le sol est aussi fait de vides, dans lesquels circulent l'air et l'eau, et qui sont autant de logements et de chemins adaptés aux besoins des animaux et végétaux. Le « milieu sol », qui varie de quelques centimètres à plusieurs mètres d'épaisseur, est structuré : les couleurs et les mottes, les vides, les pellicules et les nodules, les diverses couches qui se superposent sont autant de formes qui permettent de reconnaître les sols et leur diversité. Ces structures sont spécifiques au sol.

C'est ce sol que les hommes en voie de sédentarisation ont découvert progressivement, pour en faire en quelques millénaires la source principale de leur développement. Pour se nourrir et se soigner, pour se désaltérer et se loger, pour s'habiller, s'éclairer, se chauffer, les hommes, partout dans le monde, ont découvert qu'ils pouvaient puiser dans les sols, à condition cependant de ne pas les épuiser...

Continuellement créé, formé par des processus liés à la vie, le sol permet le développement, la diversification et le renouvellement de la vie animale et végétale à la surface des continents. Des bactéries aux racines des plantes, hébergeant une multitude d'êtres vivants, le sol leur permet de résister aux conditions les plus défavorables : sécheresses, inondations, grands froids ou chaleurs excessives... Depuis 400 à 500 millions d'années, peut-être beaucoup plus, le sol se forme lentement, par des processus de très longue durée en relation étroite avec les autres milieux terrestres : l'eau, l'air, la biosphère, les roches, les écosystèmes auxquels les sols appartiennent et contribuent. Le sol prend naissance à partir des roches, il s'épaissit et se différencie en fonction des conditions climatiques, de la végétation, du relief. Le sol cependant reste mince, de quelques dizaines de centimètres à quelques mètres : produit résiduel d'une longue histoire, le sol est un épiderme fragile.



1 Brésil central – Goiás

Le sol, couverture continue jaune et rouge, est issu de la roche (ici un schiste gréseux mauve). Il accueille la vie animale et végétale (ici une savane arborée), qui est le moteur principal de sa naissance et de son développement.



2 Maroc – Haut Atlas

Les hommes vivent des sols.

L'alimentation, l'habitat, l'énergie, les minerais sont fournis par les sols. Ici, un paysan travaille le sol pour y faciliter la pénétration de la prochaine pluie : pour que se constitue la réserve d'eau nécessaire à la croissance des plantes, mais aussi pour empêcher le ruissellement, donc l'érosion, de détruire le sol.



© M. Desso

3 France – Montpellier

De plus en plus souvent, des ruptures surviennent dans les relations millénaires tissées entre les hommes et les sols. Les villes enterrent les sols, sans se préoccuper ni de leur richesse, ni de leurs fonctions.

Aujourd'hui, les hommes en sont devenus les maîtres, constructeurs ou destructeurs selon les cas. Ils ont le pouvoir de transformer les sols, très rapidement, jusqu'à les faire même disparaître en quelques instants, avec de graves conséquences pour les cycles de l'eau et de l'air, pour la biodiversité... et pour les hommes eux-mêmes. Un pouvoir d'autant plus dangereux qu'il est souvent devenu aveugle, inconscient, imprévoyant ; les sociétés humaines ne se sont pas souvent donné les moyens d'accompagner leur développement d'une meilleure connaissance des sols, qui leur permettrait d'y être plus attentives et de mieux les préserver pour mieux les utiliser.

L'histoire récente est inquiétante. Depuis quelques décennies, les hommes deviennent de plus en plus nombreux : cet accroissement de la population fait que les sociétés humaines demandent toujours plus aux sols. Pour répondre à leurs besoins, les hommes exploitent les sols, ce qui est normal : les sols sont essentiels aux hommes. Mais trop souvent, cette exploitation s'accroît sans que l'homme se préoccupe des conséquences, non seulement sur les sols mais aussi sur tout ce qui est en relation avec eux : l'union entre les sols et les hommes, qui a pu fonctionner quand les hommes

étaient moins nombreux, se rompt en provoquant de graves dysfonctionnements. Partout dans le monde, les sociétés humaines vivent des sols, mais elles les connaissent mal. Il en résulte des erreurs d'usage qui induisent de fortes dégradations des potentialités et des fonctions majeures assurées par les sols : en retour, ces dégradations influencent les conditions de vie des hommes.

Connaître les sols de façon à mieux les utiliser est devenu une urgence : il faut nourrir et permettre le développement de six milliards d'humains aujourd'hui, de trois milliards de plus d'ici 2050. À la pression de plus en plus forte exercée sur les sols et leur environnement, il va falloir répondre de façon nuancée : en prenant en compte leurs caractéristiques, leur diversité, leurs dynamiques, leurs logiques spatiales et temporelles, ainsi que les diverses fonctions qu'ils assurent. Pour cela, les citoyens du monde devront comprendre les sols, là où ils habitent, là où ils voyagent. Ils devront savoir s'en inquiéter ou se rassurer ; ils devront pouvoir évaluer les conséquences des erreurs commises sur les sols par les sociétés humaines d'hier et d'aujourd'hui.



© R. Poss

4 Afrique du Sud – Natal

Des élevages bovins en excès et mal gérés piétinent et tassent les sols, ce qui provoque leur érosion.

Socle de la production alimentaire, réservoir d'eau et de matières premières, lieu de stockage du carbone, filtre, réservoir de biodiversité, le sol vit caché, à l'abri des regards. Le plus souvent, il est couvert par la végétation qui s'y enracine mais aussi par les constructions humaines qui y plongent leurs fondations. Dans bien des cas cependant, le sol se voit, se devine : selon les saisons, il fait diversement partie des paysages, il s'offre aux regards distraits des voyageurs qui, le long des routes et autres voies de communication, le voient sans le regarder, le regardent sans le comprendre et sans voir les graves menaces qui pèsent sur lui, et donc sur les cycles de l'eau, de l'air et de la vie.



© IRD / J.-P. Raffalli

5 Bolivie – Département d'Oruro

Les riches sols noir d'origine volcanique incitent la vie, les champs de quinoa, à éclater de couleurs.

Là est notre souci : force est de constater qu'à notre époque, la connaissance du sol ne fait pas partie des connaissances élémentaires acquises dès le plus jeune âge ; le sol ne fait pas partie des savoirs populaires. Beaucoup de ceux qui regardent les paysages, promeneurs ou naturalistes, usagers ou artistes, ne voient pas les sols, c'est-à-dire qu'ils n'y prêtent pas attention, donc ne comprennent pas la signification de ce qu'ils voient, par exemple celle des couleurs et des formes introduites par les sols dans les paysages. Plus grave, beaucoup de ceux qui utilisent les sols, en milieu rural comme en milieu urbain, en ont des visions et interprétations simplistes, qui conduisent à de graves erreurs d'usage. Et beaucoup de ceux qui aujourd'hui se penchent sur l'avenir de notre monde oublient dans leurs raisonnements de prendre en compte la « pédodiversité », la diversité des sols : comme s'ils pouvaient tous être utilisés de la même façon !

Neuf milliards d'humains sur la Terre en 2050 : il va falloir durablement les nourrir, les alimenter en eau douce, répondre à leurs besoins énergétiques, contenir leur influence sur les changements climatiques, gérer leurs déchets... ; cela ne sera possible qu'avec la « complicité » des sols, que nous devons apprendre à connaître et à mieux utiliser.

Telle est la contribution que cet ouvrage espère apporter.

Livre d'images et outil de première découverte, il participe à cette indispensable prise de conscience et de connaissance des sols et de leurs fonctions. Par l'image, simplement commentée, le sol est présenté : ce qu'il est, comment il se construit, à quoi il sert, son unité et ses diversités, comment faire pour le découvrir et l'utiliser sans l'abîmer...

Les deux premiers chapitres permettent de découvrir comment on peut « décortiquer » les sols et leurs principales propriétés en prenant le temps de les regarder et de les toucher. Puis, on s'interroge, dans les trois chapitres suivants, sur les fonctions des sols, sur les dangers auxquels ils sont exposés et enfin sur les relations, sur les alliances que les hommes doivent tisser avec les sols pour contribuer à mieux réussir l'avenir de la planète : avenir à rechercher dans la valorisation des diversités, humaines et naturelles, dont les sols sont un élément majeur.

Cet ordre de présentation n'a cependant rien d'obligatoire pour le lecteur. Selon ses motivations et ses connaissances, chacun choisira son itinéraire, les cinq chapitres ayant été écrits indépendamment les uns des autres.

Faites donc comme il vous plaira : les chapitres 1 et 2 répondent à votre curiosité, le chapitre 3 motive, le chapitre 4 inquiète, le chapitre 5 incite à l'engagement.

Le sol : un milieu original





© IRD/71. Ruf

Champ de tournesols – Chine

Le sol : un milieu original

*Le sol est lieu de vie
et lieu de mort
pour redonner la vie*

Le sol, c'est-à-dire ?

Le sol est la couche de « terre » qui recouvre les continents. Une couverture très fine, de quelques centimètres à quelques mètres seulement, dans laquelle vient s'ancrer la vie : les plantes y plongent leurs racines, de nombreux animaux y trouvent le gîte et le couvert, les sociétés humaines y puisent nourriture, énergie, matériaux. De la naissance à la mort, le sol est lieu de vie, continu ou discontinu, pour des milliards d'organismes animaux et végétaux. Il est également lieu de mort pour y redonner la vie.

Un milieu naturel et caché

Le sol est un milieu naturel. Il occupe, à la surface des continents, une position stratégique : au-dessus des roches, à partir desquelles il se forme par altération et transformation de celles-ci sous l'action de l'air, de l'eau et de la vie. Le sol se situe donc là où il y a interpénétration entre les roches, les eaux, l'air et la vie.



France – Mayenne
Le sol est souvent peu visible.

Ici il est caché sous du blé. On peut cependant percevoir le rôle du sol par rapport au relief ondulé. L'altération de la roche et la formation du sol s'accompagnent toujours d'une perte de matière : il y a, de ce fait, affaissement de la surface, d'autant plus importante que la perte de matière est plus forte. Ici, la roche-mère du sol est un schiste qui s'altère facilement. Au sein de ce schiste, on trouve des bancs plus résistants, qui s'altèrent plus difficilement, plus lentement : il en résulte une ondulation très nette de la surface du sol, les vallons concaves correspondant à des bancs de schiste facilement altérables, et les parties convexes à des bancs plus résistants à l'altération. Ce microrelief joue un rôle important pour la circulation latérale de l'eau, sur et dans le sol.

Le sol fait partie du quotidien des hommes ; la plupart du temps, ceux-ci n'y prêtent guère attention. En ville, il est caché sous les constructions qui l'asphyxient et le détruisent ; c'est pourtant lui qui permet la présence des arbres, des parcs et des jardins qui verdissent et fleurissent les paysages urbains. En milieu urbain, le sol existe : il faut le connaître pour savoir l'utiliser et le valoriser. Dans les campagnes, les paysages qui nous entourent au quotidien sont largement

façonnés, influencés par ce que sont les sols, par leurs fonctions écologiques, par la façon dont les sociétés humaines les traitent et en font usage. Les couleurs et les formes qui diversifient les paysages sont souvent celles des sols qui recouvrent les reliefs.

Diversité des sols

Les sols en effet sont divers. Selon les climats, les roches, les reliefs, les végétations, ils ne sont pas les mêmes : leur



2 ■ Brésil – Rio de Janeiro
Sols invisibles... mais présents

Ce que l'on voit dans ce paysage célèbre dominé par l'urbain :
– la roche, dure (gneiss), les parois verticales des inselbergs (pains de sucre) ; le sol y est absent ;
– la végétation forestière, qui couvre les versants plus doux et coiffe les sommets des inselbergs ;
– sous cette végétation, le sol est présent sur quelques centimètres à quelques mètres d'épaisseur ;
– la ville, qui couvre les plaines et monte à l'assaut des versants ; elle est enracinée dans des sols, qu'elle cache.

La vie végétale et humaine révèle la présence des sols. Les sols apparaissent quand on construit. Ils apparaissent aussi quand des glissements de terrain se produisent sur des pentes construites sans précaution (favelas) : lors des pluies estivales, les couvertures de sols décrochent de leur roche-mère.



© IRD/J. Pouget

3 ■ Algérie – Atlas saharien

Des crêtes où les roches sont à nu (grès rouges) alternent avec des vallons où des sols se forment en masquant les roches. Le milieu est aride : la formation des sols y est actuellement ralentie et combattue par l'érosion.

épaisseur, les formes qui leur sont spécifiques (couleurs, agrégats, horizons...), leurs constituants (matières organiques, minéraux argileux, calcaire...) diffèrent. Ils changent également selon leur âge et les usages qu'en font les sociétés humaines. Pour avoir de bonnes relations avec les sols, les hommes doivent savoir découvrir leur diversité et en tenir compte.

Regarder le sol

Le sol se voit, se reconnaît... et se regarde : le regard est le premier outil nécessaire à sa découverte et à sa compréhension. Le sol est présent dans tous les paysages continentaux. Présent et responsable :

nombre des traits des paysages continentaux sont fonction des sols qui les façonnent.

Dans le monde entier, la diversité des sols marque les paysages : leurs surfaces colorées et structurées apparaissent dans les champs récemment travaillés ; les couches superposées qui les constituent (les horizons) sont révélées par les tranchées qui les recourent. Et même quand ils sont cachés (par exemple sous les couverts végétaux des campagnes ou sous les immeubles des villes), on peut imaginer les sols en regardant attentivement les reliefs, les roches, les eaux, les végétations, les activités humaines qui interagissent avec eux.

*Dans le monde entier,
la diversité des sols
marque les paysages.*



4 Espagne

Les tranchées révèlent les variations des caractéristiques des sols en fonction de la profondeur.

Ici le sol, brun clair et limono-sableux en surface, devient rouge et argileux vers 30 à 40 centimètres de profondeur. Il s'agit d'un sol lessivé :

- la couche superficielle claire est un horizon lessivé, c'est-à-dire appauvri en argile ;
- la couche plus profonde rouge est un horizon d'accumulation d'argile.

La limite qui sépare les deux horizons est très nette :

elle peut constituer un obstacle à la pénétration verticale de l'eau et des racines.

Cette limite est dynamique : en fonction du temps, elle se déplace vers le bas ;

en effet, au niveau de cette limite il y a destruction des agrégats :

les particules argileuses sont libérées et peuvent migrer avec l'eau, vers la profondeur ou vers l'aval.

Hauteur de la coupe : 1 mètre

Le sol, un milieu dynamique

Le sol est dynamique : il se constitue et se transforme en permanence sous l'action de l'eau, de l'air et d'une grande diversité d'organismes (micro-organismes, animaux et végétaux). Au cours du temps, le sol change d'épaisseur, acquiert de nouveaux constituants, de nouvelles formes, de nouvelles propriétés.

La formation du sol à partir de la roche (roche-mère) est un phénomène lent : l'échelle de temps est celle du siècle et du millénaire. En revanche, les changements permanents concernant les formes (les couleurs, les mottes...), l'enrichissement ou l'appauvrissement en certains constituants minéraux (argile, calcaire...) et organiques peuvent être très rapides. En particulier, les sols sont très sensibles aux variations des dynamiques du vivant : le développement, par exemple, des racines ou les activités des vers de terre et des termites modifient en permanence les constituants et les morphologies des sols. Le matériau sol n'est que lentement renouvelable, mais ses propriétés morphologiques, physiques, chimiques, biologiques peuvent être rapidement modifiées : les caractéristiques d'un sol changent d'une saison climatique à l'autre, elles se modifient en fonction de l'humidité, elles ne sont pas les mêmes de jour et de nuit. Il faut savoir en tenir compte au moment de l'interprétation des observations et des mesures destinées à comprendre et utiliser les sols.

Le matériau sol n'est que lentement renouvelable, mais ses propriétés morphologiques, physiques, chimiques, biologiques peuvent être rapidement modifiées.

© IRD/O. Barrière



5 Sénégal

Le sol est lieu de vie.

Cette termitière géante est un exemple spectaculaire de l'activité biologique sur et dans les sols (ici en milieu tropical).

Les sols interagissent avec les milieux

Les sols, en se développant, agissent sur les autres milieux : les régimes hydrologiques (comportement des nappes phréatiques, crues des rivières...), les éléments transportés par l'eau et par l'air, les fonctionnements de la biosphère sont influencés par les sols et leurs dyna-

miques. De même, les formes du relief sont affinées en conséquence de la genèse des sols.

Enfin, le sol est un maillon essentiel du cycle géologique. En effet, c'est la formation puis l'érosion des sols qui fournissent aux océans les éléments et les matériaux à partir desquels se forment une partie des roches sédimentaires. La connaissance des couvertures pédologiques facilite la

compréhension de la géographie des roches, au même titre qu'il est nécessaire de connaître les roches pour comprendre les sols.

Le sol, donc, est important ; alors, comment faire, sans être un spécialiste, pour le découvrir, le reconnaître, le comprendre, collaborer avec lui ? La réponse est à chercher au niveau de la morphologie des sols.

La morphologie des sols

Le sol étant un milieu naturel, c'est par sa morphologie qu'il est tout d'abord facilement identifiable.

En effet, ce que tout un chacun voit des sols dans les paysages et qu'il peut interpréter à partir du regard est, principalement, du domaine de la morphologie (on pourrait dire « anatomie »). On distingue :

- des couleurs (rouge, blanc, sombre, brun, jaune...) ;
- des constituants (argiles, sables, calcaire, sels... matières organiques) ;
- des structures superficielles (mottes fines ou grossières, tassements, pellicules sans porosité, traces de roues de machines agricoles, flaques d'eau dans les champs, fissurations...) ;
- des morphologies de profondeur, visibles quand il y a des coupes (les couches superposées, leurs couleurs et leurs structures) ;

(suite p. 22)

Encadré 1

La morphologie des sols : du microscope au paysage

Au sein d'une couverture de sols, les constituants, minéraux et organiques, sont organisés les uns par rapport aux autres : ces organisations ne sont jamais quelconques ; elles donnent naissance à des morphologies originales, spécifiques du milieu sol, et qui sont différentes d'un type de sol à l'autre.

On peut découvrir, observer, interpréter ces morphologies à diverses échelles :

- les échelles microscopiques : on y voit les constituants (minéraux argileux, quartz, hydroxydes, calcite, particules organiques...) ; on y voit les organisations, les architectures qui associent les constituants. Tout cela s'interprète en termes de mécanismes, de dynamiques et d'étapes de la formation des sols ;
- les échelles millimétriques et centimétriques : on y observe les constituants, les agrégats (les mottes) qui associent les constituants, les vides (les porosités), les couleurs... les relations qui associent ces morphologies ;
- les échelles décimétriques et métriques qui sont celles du profil pédologique, au sein duquel se succèdent, verticalement et latéralement, plusieurs horizons : chaque horizon est une couche, qui se décrit en termes de constituants, de couleurs et de structures, ainsi qu'en termes de morphologie des transitions entre les horizons ;
- les échelles paysagiques : c'est l'échelle de la couverture pédologique, qui permet



5 France – Vallée du Tarn
Les sols, en se développant, agissent sur les autres milieux.

Un épisode pluvieux important a provoqué une forte érosion de sols rouges : les produits érodés, essentiellement argileux, se retrouvent dans les eaux du réseau hydrographique, qui rougissent.

de décrire et comprendre les organisations verticales et latérales.

Toutes ces morphologies constituent l'anatomie des sols. Elles sont spécifiques et originales, complètement différentes des structures géologiques et des structures biologiques.

Les morphologies pédologiques sont en relation directe avec les propriétés physiques, chimiques, biologiques, mécaniques des sols : elles expriment et influencent ces propriétés, leur histoire et leur dynamique actuelle.

Ainsi, le regard sur les morphologies des sols permet :

- de reconnaître leur présence, en particulier de distinguer le sol de la roche sous-jacente à partir de laquelle il se forme ;

- de découvrir et de comprendre, en un lieu donné, les principales propriétés, les principaux comportements des sols, des couvertures pédologiques ;

- de construire des hypothèses concernant le fonctionnement actuel, mais aussi l'histoire et, à partir de là, l'avenir des couvertures de sols : on est alors conduit à la découverte des unités pédologiques, qui sont caractérisées par leur morphologie, par leur dynamique actuelle et par leur histoire ;

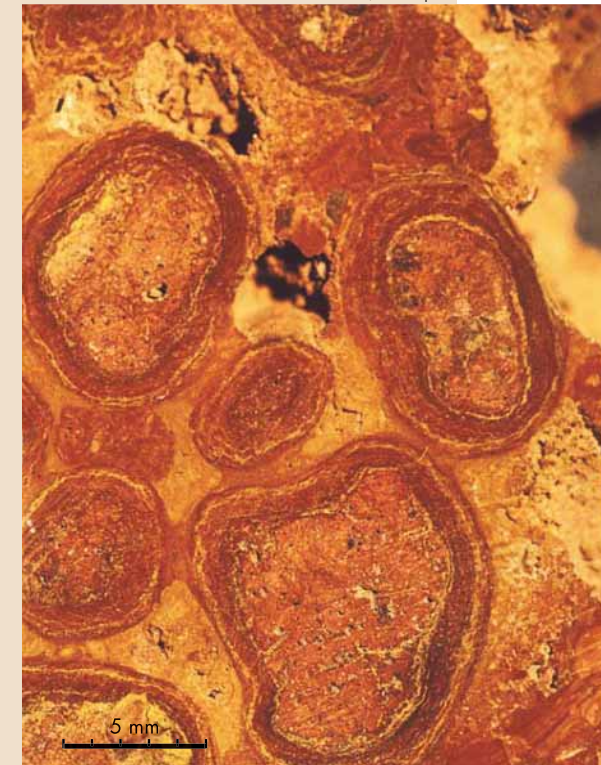
- de mettre en évidence les principales fonctions des unités pédologiques, en relation avec la lithosphère, l'hydrosphère, l'atmosphère, la biosphère et l'anthroposphère.



© J.-P. Legros

7 France – Languedoc
Où est la roche ? Où est le sol ?

Ce que l'on voit, de couleur rose, est principalement de la roche sédimentaire. Cette roche est recouverte d'un sol peu épais car régulièrement érodé : ce sol n'est présent que là où il est retenu par la végétation, qui lui donne naissance. Cette roche sédimentaire, qui date du Permien (fin de l'ère Primaire), s'est formée par dépôt dans des milieux marins ou lacustres de matériaux en provenance de l'érosion de sols rouges tropicaux. Ainsi les sols sont à l'origine des roches... à partir desquelles se formeront des sols... et ainsi de suite.



© IRD/J.-C. Leprun

8 Burkina Faso
Un exemple de l'organisation microscopique d'un horizon d'accumulation du fer.

Il s'agit d'une carapace ferrugineuse structurée sous la forme de nodules qui se relient entre eux.

- des variations latérales, en surface et en profondeur, en fonction des roches, des reliefs, des végétations, des activités humaines ;
 - des dégradations d'origine humaine : érosions, tassements, salinisation, pollutions... ;
 - des aménagements anthropiques : terrasses, labours, cultures en courbes de niveaux, irrigation, drainage, urbanisation, constructions avec des matériaux issus des sols...
- Tout cela permet d'identifier les sols, leur présence et leur diversité ; tout cela permet de comprendre les sols et leurs rôles.

Le sol, à savoir la couverture pédologique, depuis la roche (roche-mère) jusqu'à la surface, est constitué de couches qui se superposent verticalement et se succèdent latéralement : ce sont les horizons pédologiques.

Décrire pour comprendre la couverture pédologique et ses horizons

Les horizons pédologiques

Le sol, à savoir la couverture pédologique, depuis la roche (roche-mère) jusqu'à la surface, est constitué de couches qui se superposent verticalement et se succèdent latéralement : ce sont les horizons pédologiques.

La formation des horizons et de leurs caractères (morphologiques, minéralogiques, physiques, chimiques, biologiques...) est le résultat des mécanismes physico-chimiques et biologiques qui transforment les roches en sol : il y a altération des minéraux, migrations verticales et latérales des constituants issus des altérations, structuration des matériaux résiduels et accumulés (cf. chap. 2). Pour reconnaître et comprendre la présence et la diversité des sols dans un paysage donné, leurs caractéristiques, leurs dynamiques, leurs rôles, il faut savoir les décrire ; on dispose pour cela de quatre caractères morphologiques, que l'on peut observer en surface et au niveau des horizons : les couleurs, les agrégats, les vides, les traits pédologiques.

Les couleurs pédologiques

Le sol est un milieu très coloré, avec de nombreuses variations verticales, latérales

et temporelles. Quand les sols sont à nu, ils contribuent fortement par leur couleur à caractériser les paysages.

Ainsi à l'automne, après les labours, la France du Nord, au climat tempéré humide, est brune alors que la France méditerranéenne rougit : ce sont les climats qui s'expriment ainsi dans les paysages par le canal des sols et de leurs constituants. De même, en Afrique du Nord, quand on va des côtes méditerranéennes sub-humides vers le Sahara désertique, les couleurs des sols, dominant les paysages, passent à la fois du rouge au brun et du foncé au clair.

Verticalement, ce sont les couleurs qui permettent de reconnaître rapidement l'existence des horizons superposés.

Par exemple, en région continentale froide en hiver, un sol bien développé, sous forêt, sur loess, verra se succéder, sur 150 cm d'épaisseur (photo 9) :

- une litière organique : c'est un horizon O, dont la couleur s'assombrit du haut vers le bas ;
- un horizon de surface de couleur brun sombre ; la couleur sombre est due à la présence de matière organique, mélangée et associée aux particules minérales : c'est un horizon A, organo-minéral ;
- un horizon gris clair : la couleur claire est due à l'absence de matières organiques et à un appauvrissement en particules argileuses et en fer : c'est un horizon E, lessivé ;
- un horizon brun foncé ; la couleur est due à l'accumulation de particules argileuses et de fer, en provenance de



9 Sibérie
L'observation des couleurs permet de comprendre très vite ce qu'est un sol.

Ici, les six horizons de couleur d'un sol lessivé sur loess (voir la description dans le texte et dans l'encadré 2 sur la signification des couleurs).



10
11 Indonésie – Java
Les sols, ce qu'ils sont et comment ils fonctionnent, se reconnaissent, d'abord, par leurs morphologies : il s'agit principalement de leurs couleurs et de leurs agrégats.

Ici, en Indonésie, à Java, les sols de rizières sont très argileux (argiles gonflantes) : la surface est très fissurée, délimitant des mottes très compactes qu'il faut détruire manuellement après chaque récolte.

l'horizon E : il s'agit d'un horizon Bt d'accumulation d'argile ;

– un horizon dont la couleur passe progressivement de la couleur brun foncé du Bt à la couleur un peu plus claire du lœss (roche-mère) : c'est un horizon C d'altération de la roche.

Les couleurs des sols expriment nombre de leurs propriétés : la présence de certains constituants (matière organique, argiles, calcaire, sels...), l'action de certains mécanismes de formation (lessivage, accumulation...), les conditions climatiques et hydriques locales (drainage, excès d'eau...). Il est donc possible à partir d'une observation précise des couleurs des sols de commencer à raisonner sur leur fertilité et les conditions de leur utilisation par les sociétés humaines.

Les structures en agrégats

Les horizons, reconnus par les variations de couleur, se caractérisent aussi par la morphologie des agrégats (mottes) qui associent les constituants.

Les agrégats se décrivent par leur taille (du millimètre à la dizaine de centimètres), par leur forme (agrégats arrondis, anguleux, feuilletés), par leurs relations avec l'activité biologique (pénétration des racines au sein des agrégats), par leur stabilité : quand on les met dans l'eau, ils résistent ou ils se défont, plus ou moins vite et plus ou moins complètement.

Les formes et les stabilités des agrégats sont pour beaucoup fonction des constituants : la minéralogie, ainsi que les

formes et les tailles des particules, mais aussi l'état de ce que l'on appelle le « complexe adsorbant » des argiles et des matières organiques.

On appelle complexe adsorbant les surfaces, électro-négatives, des particules argileuses et organiques qui ont la capacité de retenir, d'adsorber des cations : quand ces cations sont bivalents, tel le calcium Ca^{++} , ils forment des ponts entre les particules, entraînant ainsi la formation d'agrégats stables ; par ailleurs le complexe adsorbant, en retenant des cations tels le calcium, le potassium et quelques autres, joue un rôle de garde-manger pour l'alimentation des plantes. Le complexe adsorbant est l'un des acteurs majeurs du rôle filtre joué par le sol : c'est lui qui retient, autant qu'il le peut, certains des polluants minéraux et organiques.

Les activités biologiques et anthropiques influencent aussi fortement la construction des agrégats : il y a par exemple fabrication d'agrégats arrondis et plus ou moins poreux par les vers de terre ou par les fourmis.

On peut ainsi, en observant les agrégats, poursuivre les raisonnements entamés avec l'observation des couleurs.

Les vides

Le sol est un milieu poreux, beaucoup plus poreux que les roches.

La porosité a pour origine principale l'altération des roches : le sol qui prend naissance est le résidu (suite p. 25)



12 Mauritanie
Sol hydromorphe de mangrove.

En milieu gorgé d'eau, les altérations des constituants et les migrations des éléments dissous sont traduites par de fortes colorations.

Encadré 2

Signification des couleurs des sols

Le sol est un milieu très coloré, avec de nombreuses variations verticales, latérales, temporelles. Les couleurs des sols s'interprètent en termes de constituants et de mécanismes.

Les constituants qui colorent les sols

- la matière organique colore en sombre (noir, marron, gris foncé...)
- le calcaire et les sels solubles colorent en blanc
- le fer ferreux (fer réduit dont la présence est due à un excès d'eau) colore en gris ou bleu
- le fer ferrique (oxydé) sous forme d'oxyhydroxyde (goethite) colore en brun ou en jaune : la goethite est la conséquence d'un régime hydrique assez peu contrasté (le sol est souvent humide mais sans excès, alternant avec des phases de sécheresse ni fréquentes ni excessives)
- le fer ferrique sous forme d'oxyde (hématite) colore en rouge : l'hématite est la conséquence d'un régime hydrique contrasté, avec alternance fréquente d'une humidité forte mais aérée et d'une sécheresse accentuée

Les mécanismes qui colorent les sols

- les activités biologiques : elles accumulent de la matière organique, les couleurs s'assombrissent
- les migrations et accumulations de calcaire et de sels : les horizons d'accumulation blanchissent
- les migrations et accumulations d'argile (et du fer qui l'accompagne) : les horizons appauvris s'éclaircissent ; les horizons d'accumulation brunissent ou rougissent
- les régimes hydriques :
 - . les horizons très bien drainés, recevant beaucoup d'eau mais s'asséchant vite et souvent, sont facilement rouges
 - . les horizons drainant moyennement bien sont bruns ou jaunes
 - . les horizons drainant mal sont gris ou tachetés (de gris, de rouille, de jaune, de noir)



© M. Dosso

13 France – Languedoc

En milieu méditerranéen, le sol rouge (Terra Rossa) est souvent le résidu de la dissolution d'un calcaire compact.

Cette terre rouge est argileuse, saturée en calcium, mais elle n'est pas calcaire.

La couleur rouge est due à la présence de fer sous la forme d'hématite, ce qui signifie que le sol est à la fois bien alimenté en eau et bien drainé.

Cette terre rouge est très fertile, mais sa mise en valeur est rendue difficile par sa répartition en poches.

Encadré 3

Signification des structures en agrégats

Les **agrégats arrondis** (photo 14) sont favorisés par les activités biologiques, par les matières organiques et par la présence, à la surface des particules argileuses et organiques (complexe adsorbant), de cations bivalents (Ca^{++} , Mg^{++}) ou trivalents (Al^{+++}) qui facilitent l'attraction des particules entre elles.

Les **agrégats anguleux** (photo 15) sont favorisés par la présence de minéraux argileux en quantités significatives, par l'absence d'activités biologiques, par de faibles teneurs en matières organiques. Les agrégats anguleux sont plus compacts, moins friables, moins stables que les agrégats arrondis : de ce fait, les horizons contenant une majorité d'agrégats anguleux sont moins accueillants pour le développement de la vie (en particulier des racines) que les horizons où dominent les agrégats arrondis.

Les **agrégats feuilletés** constituent souvent un obstacle horizontal à la pénétration verticale des racines et de l'eau. On les trouve dans de vieux horizons d'accumulation de calcaire ou de silice. Mais ils ont aussi fréquemment pour origine un travail agricole inadapté, réalisé dans de mauvaises conditions d'humidité : il y a tassement des sols et développement, en surface et à faible profondeur, de structures feuilletées qui vont faciliter le ruissellement des eaux de pluies... et l'érosion. Parmi les agrégats feuilletés, il faut citer ceux qui sont en plaquettes obliques : ce sont les structures dites vertiques, qui caractérisent des horizons riches en argiles gonflantes (smectites, parmi lesquelles la montmorillonite).

Certains horizons très sableux n'ont pas d'agrégats : on dit que leur structure est **continue**.



14 Brésil sud
Agrégats arrondis d'un horizon bien cultivé. Les racines sont intimes avec les agrégats.



15 Maroc oriental
Agrégats anguleux prismatiques développés dans un horizon argileux d'un sol colluvial.
Les prismes sont assez fins (2 à 5 cm de large) et allongés (10 à 15 cm de hauteur). Ils sont difficilement pénétrables par les racines et par les organismes vivants.



16 Maroc oriental
Surface d'un sol limono-calcaire à porosité fermée = croûte de battance.
Cette structure est la conséquence d'une forte pluie qui a détruit les agrégats créés par un labour. Elle favorise le ruissellement des pluies à venir et l'érosion.

de cette altération, un résidu beaucoup plus poreux que la roche à partir de laquelle il se forme. Au sein de ce résidu, l'altération se poursuit, des agrégats se forment, la vie fait son travail, des migrations de matière se développent ; tout ceci se traduit par des porosités nouvelles.

La porosité, sa morphologie, son volume, sa stabilité, est moteur des fonctions jouées par les sols dans les domaines de l'eau (dynamique et chimie) et de l'atmosphère (échanges gazeux) : le sol est un filtre dont les performances dépendent de la porosité, c'est-à-dire de la morphologie des vides mais aussi des caractéristiques des constituants qui forment les parois des vides (cf. chap. 3).

Les traits pédologiques

Au sein des sols, les migrations de matières sont permanentes : cela concerne principalement les particules les plus fines et les éléments solubles. Ces matières dissoutes ou mises en suspension sont transportées via la porosité, puis déposées. Ces migrations peuvent être verticales, vers le haut ou vers le bas, ou latérales vers l'aval. Les lieux de départ (horizons lessivés) voient souvent leur porosité augmenter ; alors que dans les lieux d'arrivée se forment des figures d'accumulation : revêtements et nodules. Ce sont des traits pédologiques.

La faune joue aussi un rôle de transporteur : parmi les spécimens les plus célèbres, citons les vers de terre, les fourmis, les termites. Ils laissent des traces, appelées pédotubules.

Histoire et fonctionnement des sols

Les sols tels que nous les voyons aujourd'hui ont une histoire, dont on peut

essayer de reconstituer les principales étapes : la connaissance du passé permet de mieux comprendre leurs comportements actuels et d'estimer les conséquences à leur égard de certaines interventions humaines.



© IRD/Y. Boulvert

17 Guinée

En milieu équatorial, les sols sont très épais. En particulier, les roches sont altérées sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur : ce sont des horizons C au sein desquels l'altération des minéraux se fait sans modification des structures pétrographiques.

Regarder le profil

Les morphologies, les horizons que l'on observe actuellement se sont formés progressivement les uns après les autres : aujourd'hui, ils continuent à évoluer, à se transformer, souvent au détriment de certains de leurs voisins.

En particulier, les limites qui séparent les horizons sont dynamiques : ce sont des fronts de transformation, au niveau desquels une morphologie en remplace une autre. L'étude morphologique de ces limites permet de comprendre comment le sol s'est formé et dans quel sens il évolue aujourd'hui, dans ses structures mais aussi dans ses constituants et dans ses propriétés physico-chimiques.

Le premier moteur de ces transformations se situe à la surface du sol, où fonctionnent l'altération des constituants minéraux, le départ en solution des produits de l'altération, l'érosion hydrique des particules : la surface s'abaisse, provoquant l'enfoncement de l'ensemble du sol.

Ainsi, à l'échelle d'un profil vertical de sol, on peut reconnaître et interpréter trois types d'unités morphologiques dynamiques :

- des organisations élémentaires (agrégats, vides, revêtements...) ;
- des horizons ;
- des limites et transitions qui associent ou séparent les organisations élémentaires entre elles et les horizons entre eux.

*Sortir du trou...
et regarder le sol
à l'échelle du paysage.*

Sortir du trou

L'étude morphologique d'une coupe, d'un « profil » de sol au sein d'un trou, d'une tranchée creusée à cet effet nous apprend beaucoup. L'approche est cependant incomplète ; manque, en effet, une dimension essentielle : c'est la dimension latérale, spatiale, celle de la couverture pédologique. Aussi, pour poursuivre la découverte du fonctionnement et de l'évolution du sol, de son histoire et de son avenir, il faut « sortir du trou » et regarder le sol à l'échelle du paysage, l'objectif étant alors de découvrir les distributions latérales des horizons et de leurs superpositions, de situer leurs limites latérales. On découvre alors l'existence de couvertures pédologiques, au sein desquelles les transferts latéraux de matières établissent des relations : ce sont des systèmes pédologiques dont la différenciation morphologique est fonction non seulement des climats, des roches, des reliefs, des couvertures végétales, mais aussi de leur âge.

Et c'est ainsi que l'on peut découvrir que, dans un paysage donné, des ensembles pédologiques géographiquement voisins peuvent n'être différents que parce qu'ils en sont à des stades divers d'une seule et même histoire. Ainsi le temps détermine-t-il une partie de la distribution spatiale.

Encadré 4

Sol – Couverture pédologique – Système pédologique

Le sol, un sol : qu'est-ce que cela veut dire ? Un être vivant est un individu bien délimité, mais il n'y a pas « d'individu sol » équivalent à l'individu animal ou végétal.

La couverture pédologique

C'est une expression plus exacte, plus conforme à la réalité, qui permet de rappeler que le sol est un milieu continu, une couche continue qui recouvre les roches sous-jacentes. Pour exprimer ce qu'est le sol d'un lieu donné, d'une parcelle, d'un versant, la description verticale du sol en un seul point (observation à la tarière ou dans une fosse) est insuffisante : il faut décrire et comprendre les variations latérales (des couleurs, des structures, des horizons...) qui ne sont jamais aléatoires. Admettons-le, il est plus léger de dire « le sol » plutôt que « la couverture pédologique », à condition cependant d'avoir présent à l'esprit que quand nous parlons d'un « sol », c'est bien une couverture pédologique que nous avons en tête.

Un système pédologique

Il s'agit d'une portion de couverture pédologique au sein de laquelle on distingue un certain nombre de dynamiques communes, verticales et latérales. Par exemple, le long d'un versant, les caractères morphologiques, physico-chimiques, biologiques de la couverture pédologique à l'aval fonctionnent et se développent en relation avec ceux de l'amont. L'unité sol existe à cette échelle du système pédologique.

On peut donner du système pédologique la définition suivante : un système pédologique est une portion de couverture pédologique qui, par ses constituants, ses morphologies et ses dynamiques constitue une unité. Il en existe plusieurs types. Chaque système est un volume de sol (ensemble tridimensionnel) au sein duquel les constituants sont organisés entre eux d'une manière spécifique, mais aussi se transforment et se déplacent, verticalement et latéralement, de manière spécifique. Dans l'espace et dans le temps, les constituants, les morphologies et les dynamiques d'un système pédologique se modifient : ces modifications contribuent à l'identification de chaque type de système. Dans l'espace, un système pédologique couvre des surfaces allant de la dizaine de m² jusqu'à, plus souvent, quelques dizaines d'hectares, voire plus. À l'échelle du paysage, divers types de systèmes pédologiques existent, se côtoient, en fonction des roches, des reliefs, des couverts végétaux, des activités humaines... Dans le temps, un système pédologique évolue et se transforme en permanence.



18 Côte d'Ivoire
Sol lessivé.

Le départ des particules d'argile, associées à des composés ferreux, éclaircit la couleur de l'horizon appauvri.

La limite entre les deux horizons, clair et rouge, est dynamique : c'est un « front de transformation » au niveau duquel la structure continue, sans agrégats, de l'horizon lessivé remplace les structures arrondies et anguleuses de l'horizon d'accumulation d'argile sous-jacent.



© IRD/R. Fauck

19 Burkina Faso

Sous climat tropical aride, sur un granite, formation d'un sol rouge, peu épais. La couleur rouge témoigne d'un bon drainage.

Le profil de sol est l'outil indispensable pour la découverte de la réalité pédologique. Mais cette réalité, morphologique et fonctionnelle, se situe au niveau de la couverture pédologique, dont les profils ne sont que des échantillons. Le difficile travail du pédologue consiste à découvrir un milieu continu caché, à l'aide d'observations discontinues. Mais « Yes, we can », à condition cependant de ne pas se tromper de démarche ni de modèle : l'inventaire mondial des profils verticaux possibles est à peu près terminé ; mais l'inventaire de la réalité, c'est-à-dire des types de couvertures pédologiques, de systèmes pédologiques, est à peine commencé. Il est grand temps de s'y mettre si l'on veut que les sols puissent être sérieusement pris en compte dans les modèles de prévision de l'avenir de la planète, dont ils sont l'un des déterminants majeurs.

Promenades parmi les sols





IRD/P. Podwojewski

Paysage agricole en Équateur

Promenades parmi les sols

Les sols sont morphologiquement originaux... et tous différents.

Les sols : tous pareils, mais tous différents

Nous l'avons montré dans le premier chapitre : les sols sont morphologiquement originaux. Leurs couleurs, leurs structures, les horizons qui se superposent permettent, partout dans le monde, de les identifier et de les distinguer. Tous les sols ont quelque chose en commun : le « sol-type » existe.

Et pourtant les sols, comme les hommes, sont tous différents. Chaque « individu » sol, chaque couverture pédologique a son identité : le sol n'est pas le même à l'amont et à l'aval d'un versant ; il diffère sur une roche calcaire et sur un granite ; le sol cultivé est différent du sol sous forêt ; les sols changent d'une région climatique à l'autre ; ils sont divers en fonction de leur âge et de l'histoire qu'ils ont connue.

Ce que tous les sols ont en commun, ce qui permet de reconnaître leur présence

et leurs rôles partout dans le monde, c'est d'abord leur morphologie (leur anatomie) (cf. chap. 1) ; mais c'est aussi la rencontre en leur sein – l'interpénétration – du minéral et du vivant ; c'est encore la plus grande richesse en matières organiques de leur horizon de surface ; ce sont enfin les fonctions essentielles qu'ils remplissent vis-à-vis des cycles de l'air (atmosphère), de l'eau (hydrosphère), de la vie (biosphère) (cf. chap. 3).

Les sols diffèrent les uns des autres en fonction de leurs constituants (sols argileux, sableux, limoneux, caillouteux...), de leurs couleurs (sols bruns, rouges, jaunes...), de leurs structures (agrégats arrondis, anguleux...), des porosités, des horizons, des épaisseurs... Tout cela change au sein d'un paysage, et d'un paysage à l'autre. Ces différences traduisent des dynamiques diverses, des comportements et des qualités différents ; elles traduisent aussi, vis-à-vis des besoins des hommes, des potentialités et des contraintes diversifiées : la pédodiversité est grande et les sociétés humaines traditionnelles ont souvent su en tenir compte ; en revanche, les sociétés modernes cherchent plutôt à échapper à cette diversité des sols en ne la prenant pas en compte : au cours du XX^e siècle, les sociétés humaines ont cherché à



I Brésil central – Goiás
Les sols sont morphologiquement originaux.

Le sol ici est caractérisé :

- par la présence de plusieurs « horizons » (couches) ;
- par la couleur plus sombre de l'horizon supérieur : elle est due à la présence de matières organiques en quantités significatives (quelques %) ; sa structure en agrégats est arrondie : il s'agit d'un horizon A, organo-minéral (cf. encadré 3) ;
- par la couleur plus claire du deuxième horizon : elle est due à un appauvrissement en particules fines argileuses accompagnées d'oxyde de fer : c'est un horizon lessivé E ;
- par la couleur plus rouge du troisième horizon : elle est due à un enrichissement en particules fines argileuses, accompagnées d'oxyde de fer, la structure en agrégats étant anguleuse ; c'est un horizon d'accumulation Bt ;
- par la couleur très claire du quatrième horizon : il s'agit de l'horizon d'altération de la roche-mère (granito-gneiss) : c'est un horizon C.

Cet exemple est celui d'un « sol-type ». En effet, dans tous les sols du monde, les horizons A et C sont présents (mais ils diffèrent selon les climats et les roches-mères).

Dans tous les sols très différenciés il y a présence, en plus des horizons A et C, d'horizons E et Bt.

Dans tous les sols moyennement différenciés, un horizon S se développe entre les horizons A et C (cf. encadré 2).



© M. Dosso

2 France – Plateau de Valensole (Provence)
Pédodiversité

Paysage méditerranéen : juste après les labours, les variations de la couleur superficielle des sols révèlent une forte diversité pédologique. Les surfaces rouges sont les moins calcaires ; les surfaces blanches sont très calcaires, les horizons rouges y ayant été amincis par l'érosion.

dominer la diversité des sols, à imposer, avec un succès mitigé, le « tout partout pareil ». Or il s'avère que l'utilisation intelligente, optimale des sols, que ce soit en milieu agricole ou urbain, doit tenir compte de leur diversité : on en est encore loin !

*La pédodiversité est grande,
il faut savoir en tenir compte.*

Les mécanismes de genèse et d'évolution des sols

Pour comprendre d'où vient la pédodiversité et ce qu'elle recouvre, il faut plonger dans les origines des sols : quels sont les principaux mécanismes de la genèse et de l'évolution des sols qui non seulement vont leur donner naissance, mais aussi les conduire à se distinguer les uns des autres ?

Quatre grands types de mécanismes travaillent à la formation permanente des sols, et cela depuis 450 millions d'années, c'est-à-dire depuis que la vie est sortie des océans pour conquérir les continents : transformation des roches, développement des activités biologiques et des accumulations organiques, migrations et accumulations minérales, agrégation.

Les mécanismes de transformation des roches et de leurs constituants

Le contact des roches avec l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère provoque des processus d'altération. Ceux-ci se traduisent par des phénomènes de désagrégation des roches et des minéraux, de dissolution de ces derniers, de migration des constituants dissous ainsi que de formation de minéraux nouveaux dits secondaires (argiles, oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium, calcite, sels...) et de particules (argiles, limons, sables). L'altération des roches fabrique, lente-

ment, le matériel minéral meuble qui va pouvoir accueillir et nourrir la vie. Elle se poursuit sans discontinuer au sein du sol : on peut ainsi considérer que le sol est un matériau résiduel, condamné à disparaître, mais qui se renouvelle sans cesse (cf. encadré 1).

Les mécanismes biologiques et d'accumulation de matières organiques

Ils se développent au fur et à mesure que l'altération permet l'interpénétration de la vie et de la roche. L'altération permet à la vie de pénétrer l'inerte (les roches) et

de s'en nourrir ; la vie et les produits organiques qui y sont associés contribuent alors à accélérer l'altération ; ils contribuent aussi à la genèse des agrégats, des vides et des traits. Ces mécanismes fonctionnent principalement dans la partie supérieure des sols, mais en y regardant de près on découvre que la vie, végétale et animale, peut pénétrer très profondément, à plusieurs mètres : elle accompagne le front d'altération et y participe. En surface, les mécanismes biologiques et organiques sont rapides : ils renouvellent, en permanence, les constituants organiques et les morphologies des horizons de surface ; à titre d'exemple, citons la reconstruction, répétée, des porosités par l'activité des systèmes racinaires et « l'agitation » des lombrics.

Les mécanismes de migration et d'accumulation des particules et des éléments générés par l'altération

Ils prennent la forme de mouvements verticaux et latéraux, qui concernent le minéral et le vivant. Ils se produisent à l'intérieur des sols mais aussi à leur surface : il s'agit alors de l'érosion, qui est un acteur naturel et permanent de la pédogenèse (formation des sols). Les érosions de la surface des sols agissent à des vitesses très diverses ; il en est de même pour les phénomènes de migration et d'accumulation au sein des sols.

Les mécanismes d'arrangements et d'agrégation des constituants

Ils donnent naissance à divers aspects de la morphologie des sols : couleurs, agrégats, vides, traits.

Ces quatre groupes de mécanismes sont à l'origine de tous les sols du monde. Cependant, selon leur localisation géographique et leur âge, selon les climats et les couverts végétaux, les roches-mères et les reliefs, les sols qui prennent naissance se différencient les uns des autres parce que les équilibres entre les divers mécanismes sont différents.

Encadré 1 Le sol, milieu résiduel

Le sol tel que nous le voyons aujourd'hui est un résidu, une couverture résiduelle, en renouvellement permanent.

En effet, l'altération des roches et la formation des constituants et des structures des sols sont accompagnées de phénomènes de dissolution et de migration, vers les profondeurs et vers les rivières, de constituants minéraux et organiques (cations alcalino-terreux, silicium, fer, aluminium, particules fines d'argile, humus...).

Il en résulte que le sol constitue par rapport à la roche un milieu nettement appauvri et nettement plus poreux.

Dissolutions et migrations se poursuivent en permanence, sur toute l'épaisseur du sol, depuis le front d'altération de la roche jusqu'à la surface, où l'érosion contribue à faire disparaître ce résidu. Si les effets de l'altération de la roche-mère sont plus rapides que les phénomènes de dissolution et de migration au sein du sol et que les phénomènes d'érosion, la couverture pédologique s'épaissit ; dans le cas contraire, le sol reste mince, voire s'amincit.

Encadré 2

La pédodiversité, reflet de l'histoire des sols

Pour comprendre la pédodiversité, c'est-à-dire la diversité des sols il faut aussi découvrir comment au sein d'une couverture pédologique, les horizons se forment les uns après les autres, les uns par rapport aux autres, les uns à partir et en fonction des autres. L'ordre chronologique de la formation des horizons n'est pas quelconque. Quatre étapes principales déterminent leurs répartitions au sein des paysages.

■ **Première étape**

À partir d'une roche affleurante, les premiers mécanismes qui agissent sont, conjointement, ceux de l'altération et ceux liés aux activités biologiques. Deux types d'horizons prennent ainsi naissance, en même temps (photo 1) :

- en surface, un horizon **organo-minéral** A. C'est le lieu d'activité maximale de la vie au sein du matériau minéral issu de la roche ;
- en profondeur, un horizon **d'altération** C : les constituants de la roche y sont partiellement altérés, avec genèse de minéraux nouveaux et d'une porosité nouvelle. Mais cela n'affecte pas encore la structure, qui reste celle de la roche-mère. L'horizon C est fondamental pour le développement de la vie : il est friable, donc pénétrable, et il fournit aux racines beaucoup des éléments nutritifs dont les plantes ont besoin. La fertilité des sols dépend beaucoup de l'horizon C, dont les caractéristiques physiques et chimiques varient en fonction des roches.

Au terme de cette première étape, le sol est considéré comme **peu différencié**. Son épaisseur est faible : quelques centimètres à quelques dizaines de centimètres, et il ne comporte que deux horizons. Mise à part sa faible épaisseur, la fertilité du sol peu différencié est étroitement fonction de sa roche-mère, dont il reste proche.

■ **Deuxième étape**

Le sol s'épaissit : les horizons A et C se développent et un nouvel horizon, S, apparaît entre les deux (photo 3). Dans cet horizon S, les phénomènes d'altération s'accroissent avec disparition progressive de la morphologie de la roche et apparition **de morphologies pédologiques** (nouvelles formes propres au sol), en particulier de structures en agrégats.

Au terme de cette deuxième étape, le sol est considéré comme **moyennement différencié**. Son épaisseur est de l'ordre du mètre, mais dans les régions à climat chaud et humide, elle peut atteindre plusieurs mètres, voire dizaines de mètres.

La fertilité de ces sols est largement fonction de leurs roches-mères. Du fait d'une épaisseur plus grande que pour les sols peu différenciés, ils sont plus accueillants.

Cependant, si l'épaisseur de l'horizon S est trop élevée, le sol a tendance à s'appauvrir chimiquement dans sa partie supérieure : la base de l'horizon C, où les nutriments sont libérés par l'altération de la roche-mère, n'est plus atteinte par les racines ; de même, l'activité biologique ne joue plus son rôle de « transporteur alimentaire » depuis la roche en altération jusqu'à la surface : la partie supérieure du sol s'appauvrit et, en conséquence, s'acidifie.

■ **Troisième étape**

En s'épaissant, les horizons de surface de certains sols ont tendance à s'appauvrir en cations alcalins, en particulier le calcium et le potassium, qui quittent le complexe adsorbant pour y être remplacés par de l'hydrogène (photos 1 et 5) : les horizons de surface s'acidifient et cela crée des conditions de déstabilisation des agrégats, de mise en suspension et de dissolution partielle des particules les plus fines, principalement des particules argileuses, qui vont alors pouvoir migrer (en solution et en suspension), entraînées par les eaux qui traversent les sols. Ainsi prennent naissance des horizons E (horizons lessivés, éluviaux), appauvris en particules fines et des horizons Bt (horizons d'accumulation, illuviaux) enrichis en argile. Toutes ces migrations se produisent verticalement et latéralement.

Au terme de cette troisième étape, le sol est considéré comme **très différencié**. Après le niveau maximal de fertilité atteint lors de la précédente étape, cette troisième étape est celle du « vieillissement » du sol : il y a appauvrissement physique et chimique de la partie supérieure des sols.

■ **Quatrième étape**

Parmi les sols très différenciés, les plus évolués et les plus pauvres sont les **podzols** : en milieu très pluvieux, froid ou chaud, sur des matériaux limono-sableux acides et perméables, des matières organiques agressives se forment, altèrent les minéraux, s'associent aux hydroxydes de fer et d'aluminium libérés par l'altération, forment avec ces hydroxydes des complexes pseudo-solubles qui migrent verticalement et latéralement ; un horizon E, lessivé, très appauvri en argile, de couleur gris clair, se développe ainsi sous l'horizon A organo-minéral ; sous l'horizon E, les complexes se détruisent et s'accumulent sous la forme d'un ou plusieurs horizons noirs (accumulations organo-minérales) puis ocres (accumulation des hydroxydes). En milieu tempéré froid et humide, l'épaisseur des podzols est de l'ordre de quelques centimètres à quelques dizaines de centimètres (photo 18) ; en milieu tropical humide, l'épaisseur de l'horizon E est d'ordre métrique (photo 4).

À tout moment, au cours de ces quatre étapes, **d'autres facteurs peuvent intervenir** dans le déroulement de la formation du sol :

– les particules argileuses ne sont pas les seuls constituants à pouvoir migrer et créer des horizons d'accumulation : peuvent également se produire des **migrations** et des **accumulations** d'hydroxydes de fer et d'aluminium, de matières organiques, de silice, de calcaire, de gypse, de sels ;

– des **excès d'eau** conduisent à la formation d'horizons dits « hydromorphes », au sein desquels les phénomènes d'oxydo-réduction se traduisent par des taches et des volumes colorés : rouges, jaunes, grises, noires, vertes, bleues... les couleurs étant souvent très vives ; en milieu acide, des phénomènes d'hydrolyse (dissolution et migration) des particules minérales les plus fines se produisent : on parle alors de **dégradation**.

– **l'intervention humaine** crée des horizons nouveaux, conséquences des labours, des tassements, des apports d'engrais et d'amendements : ce sont les horizons anthropiques (Ap). L'homme peut aller jusqu'à créer des sols entièrement nouveaux : sols des milieux urbains, sols en terrasses...

Diversité des sols dans le monde

Quatre facteurs responsables de l'évolution des sols vont permettre de découvrir et de comprendre les principales pédodiversités : les climats, les roches, les reliefs, le temps.

La géographie des sols en fonction des climats

Les sols des régions équatoriales et tropicales humides

C'est sous ce type de climat que l'on trouve les sols les plus épais : ils peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres et sont, de ce fait, chimiquement très appauvris dans leurs horizons de surface.

Le minéral argileux dominant est la kaolinite, produit de l'altération intense des minéraux primaires suivie du lessivage d'une partie de la silice. La kaolinite est une argile qui retient mal, à sa surface, les éléments nutritifs nécessaires au développement des plantes. Par ailleurs, l'acidité est forte, ce qui se traduit par des excès d'aluminium libre, toxique pour certains végétaux.



3 ■ Brésil – Minas Gerais

Sol rouge ferrallitique (Ferralsol), révélé par une tranchée d'érosion dont l'origine est anthropique :

le remplacement de la forêt par un pâturage mal géré entraîne le tassement superficiel des sols, puis le ruissellement.

L'horizon supérieur, organo-minéral, est peu développé ; l'horizon principal de ce sol est l'horizon rouge Sk, argilo-sableux, présent sur quelques mètres d'épaisseur ; en profondeur apparaît l'horizon rose C d'altération de la roche (granito-gneiss).

En général, l'horizon Sk rouge devient jaune là où les conditions de drainage sont moins bonnes (bas de pente, centre des plateaux...).

Cependant, sous végétation naturelle (forêt ou savane arborée), l'activité biologique, associée à la présence d'aluminium sur le complexe adsorbant, donne naissance à une agrégation fine et arrondie, poreuse et accueillante.

Au total donc, le milieu sol dans ces régions est morphologiquement accueillant mais chimiquement très pauvre.

Sous un horizon organo-minéral de quelques dizaines de centimètres, ces sols dits « ferrallitiques » (Ferralsols en langage international WRB que nous adoptons ici pour la dénomination des

sols, cf. p. 45) sont rouges quand ils sont bien drainés, jaunes quand ils le sont moins.

Les Ferralsols font fréquemment partie de systèmes pédologiques au sein desquels ils sont associés à des horizons très pauvres, lessivés, podzoliques, hydromorphes (cf. encadré 2).

Les sols des régions tropicales moins humides, à saison sèche accentuée

Ce sont des sols moins épais (quelques mètres). Les amonts sont dominés par la kaolinite, par des différenciations en



4 Brésil – Amazonie

Sol ferrallitique, rouge, associé à un podzol dont on voit l'horizon lessivé blanc.

L'étude morphologique et minéralogique du contact entre l'horizon rouge (ou jaune) ferrallitique et l'horizon blanc podzolique démontre que le podzol se forme par destruction du sol ferrallitique : il y a entre le sol ferrallitique et le podzol un **front de transformation** du sol ferrallitique par le podzol.



5 Sud du Burkina Faso – Zabré Horizons et agrégats vertiques

C'est dans les régions tropicales semi-arides, là où les pluies ne durent que quelques mois dans l'année, que se différencient les **systèmes pédologiques** les plus marqués, avec à l'amont des sols lessivés en argile (kaolinite) et enrichis, relativement, en fer (carapace et cuirasse), et vers l'aval, des enrichissements en argiles gonflantes (smectites) donnant naissance à des structures en plaquettes obliques vertiques.

Dans ce sol, situé à mi-pente, on voit conjointement l'expression des dynamiques de lessivage et d'accumulation :

L'horizon supérieur A, peu épais (10 à 30 cm) car érodé suite à la mise en culture, est appauvri en argile (kaolinite). Il contient un peu de matières organiques.

Le deuxième horizon (10 à 25 cm) est enrichi en fer (carapace Bfe) : il s'agit d'un enrichissement relatif consécutif au départ de la silice.

La partie inférieure de la carapace (de 25 à 45 cm) est poreuse et de couleur plus claire : elle est actuellement, après chaque pluie, le lieu de circulation latérale de l'eau avec formation d'un horizon lessivé en particules fines (horizon E)

Le quatrième horizon (à partir de 45 cm) est très argileux avec une structure verticale en plaquettes obliques : c'est un horizon Bv d'accumulation d'argiles gonflantes (smectites).

La limite entre le troisième et le quatrième horizon est en courbe, bombée : l'accumulation de l'argile gonflante s'est produite après la formation de la carapace ferrugineuse, qui ensuite a été soulevée par le gonflement de l'horizon argileux vertique.

En allant vers l'aval, la carapace ferrugineuse disparaît et l'horizon vertique est présent dès la surface du sol. En allant vers l'amont, la carapace augmente en épaisseur ; l'horizon vertique diminue et laisse la place à un horizon argileux à kaolinite.

horizons lessivés et horizons d'accumulations d'argile, par des concentrations d'hydroxydes de fer et d'aluminium (carapaces et cuirasses) : au total, il s'agit de sols acides chimiquement pauvres et physiquement peu accueillants.

En revanche, les avals sont souvent dominés par des argiles gonflantes (smectites) à forte capacité d'échange, capables de retenir une partie des éléments nutritifs lessivés des sols amont (calcium, magnésium, potassium, sodium...) : on y trouve des Vertisols, qui sont des sols difficiles à travailler car très argileux, mais chimiquement accueillants.

Sols lessivés de l'amont et Vertisols de l'aval forment des systèmes pédologiques, avec des couleurs plutôt rouges à l'amont et brun foncé, voire noires, à l'aval. Les teneurs en matière organique des horizons de surface sont plutôt faibles.

Les sols des régions à climat méditerranéen

Ils sont dominés par trois couleurs : le rouge, le noir et le blanc.

Le rouge est la couleur des horizons S et Bt (cf. encadré 3) des sols ferrallitiques : sols argileux, à argile moyennement gonflante, à structure fine et poreuse, à pH neutre et complexe adsorbant saturé. Ils constituent un milieu riche, bien drainé, accueillant.

Le noir est la couleur des horizons A, riches en matière organique, à structure



5 Dans les régions méditerranéennes semi-arides et sub-humides du Maroc, en milieu riche en calcaire, les sols en surface sont souvent finement structurés et de couleur sombre : cela révèle la présence de matière organique évoluée et de fortes activités biologiques qui rappellent celles des Chernozems. Par ailleurs, ces sols sont fréquemment de couleur blanche en profondeur : cette couleur est due au développement d'horizons d'accumulation de calcaire. Les horizons sombres, finement structurés, sont très fertiles.

fine et arrondie. C'est aussi la couleur des Vertisols, à argile gonflante, souvent présents à l'aval des sols ferrallitiques.

Le blanc est la couleur des horizons d'accumulation de calcaire, fréquents du fait des climats insuffisamment pluvieux et d'une géologie dominée par les roches calcaires.

Encadré 3 Les horizons pédologiques

Principaux types d'horizons pédologiques qui se superposent verticalement depuis la roche jusqu'à la surface et se succèdent latéralement le long des pentes. Chacun de ces types d'horizons est le résultat de processus pédogénétiques bien identifiés et se reconnaît sur le terrain grâce à sa morphologie spécifique : nous ne donnons ci-après que les appellations pédogénétiques.

O : horizon organique, constitué par la litière

A : horizon organo-minéral

E : horizon lessivé = éluvial = appauvri en particules fines argileuses

B : horizon d'accumulation = illuvial :

d'argile = Bt

d'hydroxydes = Bo, Bfe, Bal...

de matières organiques = Bh

de produits amorphes = Bp

de silice = Bsi

de calcaire = Bca

de gypse = Bcs

de sels solubles = Bsa

S : horizon d'altération à structures pédologiques

Sk : horizon d'altération à structures pédologiques fortement appauvri en silice, riche en kaolinite, très épais (plusieurs mètres) ; il est caractéristique des sols ferrallitiques

C : horizon d'altération à structures lithologiques ; au sein des horizons C il peut y avoir des accumulations : Ct, Co, Ch, Csi, Cca, Ccs, Csa

R : Roche-mère dure

M : Roche-mère meuble

Ap : horizon modifié, voire généré, par l'activité humaine ; dans tous les sols cultivés, Ap remplace A

G : Gley = hydromorphie permanente

g : Pseudogley = hydromorphie temporaire (horizons Ag, Eg, Btg, Sg, Cg...)

La majorité des sols des régions à climat méditerranéen sont moyennement différenciés (cf. encadré 2). Les sols très différenciés, lessivés, sont présents là où les climats sont plus humides ; les Bca d'accumulation de calcaire dominant dans les régions semi-arides et arides (Calcisols).

Les sols des régions désertiques

Ils sont hérités des époques climatiques plus humides datant, pour la plupart, du Quaternaire : on y retrouve, prisonniers sous les pellicules caillouteuses des regs, des racines de sols tropicaux ou méditerranéens : des horizons C, des horizons S,

des horizons d'accumulation de fer ou/et de calcaire.

Les sols ne sont pas absents dans les déserts ; la vie est là, mais elle dort... en attendant l'eau, « Princesse charmante » des terres du désert. Dès que l'eau apparaît, c'est la fête, l'éblouissement vert, pour quelques heures ou quelques jours.

Dans les oasis de vallées, les sols sont souvent peu évolués, se formant sur des alluvions récentes déposées par les fleuves en crue.

Mais l'eau peut aussi apporter les sels solubles : l'évaporation donne alors naissance à d'immenses zones de sols très salés, très difficiles à cultiver.



7 Niger – Sahara

Sur un glacis (versant), le « reg », fine couche de cailloux, protège de l'érosion le sol rouge sous-jacent.

Les déserts n'ont pas toujours été des déserts, les sols en témoignent.

En effet, sur de grandes surfaces, on trouve dans les déserts des sols qui datent de périodes plus humides. Ils ont été protégés de l'érosion par la formation d'un reg, fine couche de cailloux résiduels de l'érosion éolienne.

Aujourd'hui, ces sols fonctionnent au ralenti... mais ils fonctionnent.



8 Maroc – Sahara

Dans les déserts, la rencontre de l'eau et des sols : miracle ou...

Au piedmont saharien du Haut Atlas marocain (oasis de Tinherir), les alluvions et les eaux se retrouvent : la vie éclate. Les alluvions et les sols qui s'y développent permettent à la fois agriculture arborée et construction de villages. Il y a suffisamment d'eau pour empêcher la salinisation des sols.

Sur les pentes, abruptes, il n'y a que très peu de sols. Les alluvions proviennent de l'érosion de sols qui se développent beaucoup plus à l'amont, dans les montagnes du Haut Atlas.



9 Maroc – Sahara ... désolation

L'eau dans les déserts peut entraîner des dégâts dans les sols.

Ainsi, l'eau qui descend du Haut Atlas est légèrement salée.

Au piedmont de l'Atlas, cette faible salure n'a pas de conséquences, l'eau utilisée pour l'irrigation ne provoque pas de phénomènes d'accumulation de sels dans les sols.

En s'éloignant de l'Atlas vers le Sahara, une partie de l'eau rejoint les nappes phréatiques, à plusieurs mètres de profondeur. Ces nappes, profondes et peu salées près de l'Atlas, se rapprochent de la surface au fur et à mesure que l'on pénètre dans le Sahara : elles sont de ce fait de plus en plus soumises aux effets de la chaleur et de la sécheresse, donc de l'évaporation.

Sous l'effet d'une évaporation de plus en plus forte, l'eau des nappes se concentre en sels solubles et sale les sols.

Bientôt, la salinisation atteint la surface des sols, devenue blanche sur de grandes étendues.



© J.-P. Legros

10 Maroc – Sahara

Sol et eau deviennent, en s'éloignant de l'Atlas, inutilisables pour l'agriculture irriguée.

Loin de l'Atlas, là où l'eau douce des crues arrive rarement, l'irrigation conduite avec l'eau salée de la nappe phréatique provoque des phénomènes importants de salinisation des sols :

les parcelles sont laissées à l'abandon, les palmiers meurent, les villages fortifiés, édifiés en terre, sont abandonnés.

Les sols des régions à climat tempéré océanique

En pénétrant dans ces régions, non seulement on change de milieu climatique, mais on entre aussi dans des régions où les sols sont beaucoup plus jeunes : les glaciers du Quaternaire, en effet, y ont raboté les paysages, détruisant les sols ; aujourd'hui, la plupart des sols n'ont guère plus de 10 000 à 15 000 ans. Cette jeunesse des sols fait que la marque climatique est moins forte que la

marque géologique. Par rapport aux sols méditerranéens, les sols des régions tempérées océaniques sont nettement moins rouges. Dès que les roches le permettent – c'est-à-dire sur roches non calcaires –, les sols lessivés (Luvisols, Albeluvisols) et podzoliques (Podzols), associés à des sols hydromorphes (Gleysols et Histosols = tourbes), se développent : ils forment alors des systèmes pédologiques acides et peu fertiles... et pourtant assez souvent utilisés pour les productions agricoles.



© P. Curmi

11 France – Bretagne Sols bruns, sols lessivés, sols hydromorphes, sols dégradés, podzols... un festival de couleurs.

Sous climat tempéré atlantique, sur roches acides (granite, schiste, grès, alluvions...), l'altération favorise souvent la genèse de sols à texture limoneuse.

Par ailleurs, aux particules limoneuses qui naissent de l'altération des roches se sont souvent ajoutés, pendant les périodes glaciaires du Quaternaire récent, des limons apportés par les vents à la périphérie des fronts glaciaires (ce sont des Lœss).

Dans ces matériaux limono-sableux se développent des sols plus ou moins lessivés (appauvris en argile), hydromorphes (engorgés d'eau), dégradés (hydrolyse des argiles), podzolisés, répartis dans l'espace en fonction des roches, des reliefs, des âges.

En surface, les sols sont de couleur sombre quand ils ne sont pas cultivés ; ils sont brun clair quand ils le sont (baisse et évolution des matières organiques).

En profondeur, les variations d'oxydo-réduction donnent naissance à des festivals de couleurs.

Les sols des régions à climat continental froid en hiver

Il faut noter le développement, sous végétation steppique, de sols à forte fertilité : ce sont les sols dits « isohumiques », profondément enrichis en matière organique, tel le Chernozem des plaines russes, ukrainiennes, nord-américaines, argentines... Ces sols sont parmi les plus riches du monde : les fortes teneurs en matière organique, les belles structures en agrégats arrondis, d'origine biologique, les capacités d'échange élevées et saturées en font des « mines d'or ». Ils sont malheureusement en grand danger de surexploitation (cf. chap. 4). Sous forêts, les sols sont beaucoup moins riches car ils sont lessivés et podzolisés.

Les sols des régions polaires

Ils sont caractérisés par la présence, à faible profondeur, de couches gelées en permanence (permafrost). Les structures des horizons superficiels sont fortement marquées par les mouvements qui se produisent consécutivement à des alternances fréquentes de gel et dégel (cryoturbation). Les horizons supérieurs, situés au-dessus du permafrost, sont souvent très riches en matière organique, voire tourbeux. C'est dans les régions polaires que le réchauffement climatique en cours, agissant sur les sols, a et aura des conséquences particulièrement visibles : dégel du permafrost, mise en

valeur agricole des terres dégelées, décomposition rapide de quantités importantes de matière organique, libérant

vers l'atmosphère des quantités élevées de CO₂... contribuant à l'augmentation du réchauffement.



© C. Mathieu

12 Spitzberg – Norvège
Cryosol.

Les structures originales de ces sols sont la conséquence des mouvements dus aux successions de périodes de gel et de dégel : ces mouvements sont la cryoturbation.

Dans les régions de haute montagne

Les zonalités pédoclimatiques, c'est-à-dire les répartitions des sols en fonction des climats, sont à la fois horizontales et verticales, l'influence des roches et des

reliefs étant très importante. Sur les pentes fortes, les sols sont souvent absents : il y a altération des roches, mais les produits de ces altérations sont immédiatement érodés. Sur pentes faibles, en haute altitude, on retrouve

des Cryosols : par exemple, les « thufurs » ou « buttes gazonnées » ; la couverture pédologique y est présente sous la forme de buttes arrondies qui se formeraient sous l'influence des alternances gel/dégel.

La géographie des sols en fonction des roches-mères

Le deuxième facteur important de la pédodiversité est la roche-mère. Dans toutes les régions climatiques, y compris celles où les températures et les pluies sont « agressives », l'influence des caractéristiques des roches se maintient jusqu'aux horizons les plus superficiels, donc les plus éloignés de la roche.

Deux caractères des roches sont tout particulièrement influents :

- la richesse de la roche en calcium et en calcaire, et la vitesse à laquelle ces éléments sont libérés par l'altération ;
- la quantité et les types d'argiles (minéraux et particules) qui sont produits par l'altération.

Nous donnons ci-dessous quelques exemples de l'influence des roches dans diverses régions climatiques.

Ferralsols et Nitisols en milieu tropical

Dans les régions tropicales humides, là où se forment les sols « ferrallitiques », l'altération est moins poussée sur les roches-mères basiques (les basaltes, par exemple) et calcaires que sur les roches-mères acides tels les granites, schistes, grès... On a ainsi été amené à distinguer les Ferralsols et les Nitisols : les argiles kaolinitiques de ces derniers, sur roches basiques, ont des capacités d'échange nettement plus fortes que celles, très



© IRD/P. Podwojewski

13 Andes – Équateur

Un haut plateau (*paramo*), dominé par un volcan (le Chimborazo), est couvert de sols tourbeux et de buttes gazonnées (Cryosol).

faibles, des kaolinites des Ferralsols. Deux conséquences : les horizons Sk d'altération à structure pédologique des Nitisols ont des structures finement polyédriques (au lieu de grumeleuses pour les Ferralsols) et sont moins acides que ceux des Ferralsols ; ainsi, ils sont plus fertiles. Même en pleine forêt amazonienne, là où les sols peuvent être très épais, l'influence des roches basiques et calcaires se fait nettement sentir jusqu'en surface, l'épaisseur des Nitisols étant cependant plus faible que celle des Ferralsols, ce qui n'est pas un mal : les Ferralsols, trop épais, sont très pauvres.

En régions tempérées et méditerranéennes, forte influence du calcaire

Dans toutes les régions tempérées et méditerranéennes, les sols et les systèmes pédologiques diffèrent fortement selon que la roche-mère est calcaire ou non : sur roche calcaire, les sols ne dépassent que rarement un stade moyennement différencié ; au contraire, sur roche acide, les systèmes pédologiques avec horizons lessivés très différenciés sont fréquents.

On peut noter aussi l'exemple original des sols développés sur des roches calcaires dures, très compactes, très riches en CaCO_3 : le calcaire dur « fond » très lentement ; le calcaire libéré est lessivé au fur et à mesure de l'altération ; le résidu argileux, non calcaire, s'accumule dans les poches de dissolution (karst).

Ainsi naissent des sols fersiallitiques, non calcaires, très argileux et finement structurés, sur des roches-mères qui contiennent jusqu'à 99 % de calcaire ; selon les conditions climatiques et de drainage, ces sols seront rouges s'ils sont très bien drainés, ou bruns s'ils le sont moins. Ces sols sont très fertiles : ils ont un horizon S argileux, à forte capacité d'échange saturée (principalement par du calcium), finement structuré ; ils sont riches en matière organique dans les horizons A ; ce sont les sols rouges méditerranéens, les Terra Rossa, qui ont alimenté et alimentent encore de nombreuses civilisations méditerranéennes (au Moyen-Orient, ces sols sont l'une des grandes richesses du Liban, de la Syrie, de la Palestine, d'Israël...). Aujourd'hui très érodés, beaucoup de ces sols sont en danger.

Sur matériaux volcaniques

Sur les matériaux volcaniques, telles les cendres, qui contiennent beaucoup de silicates mal cristallisés, l'altération en milieu climatique humide donne naissance à des minéraux argileux mal cristallisés qualifiés d'allophe. Ce matériau d'altération mélangé à la matière organique donne naissance à des horizons A, S et C, noirs, poreux, finement structurés, souvent chimiquement riches, à comportement mécanique original : les agrégats arrondis, très poreux et apparemment secs, se liquéfient sous l'effet d'une forte pression. Ces sols sont des Andosols ; on les trouve sur les

pentades de tous les volcans du monde, plutôt en altitude, là où les climats sont suffisamment humides. Malgré les risques volcaniques, ces sols sont très recherchés pour leur fertilité.



© IRD/M. Monzier

14 Andes – Équateur

Au pied du volcan (partiellement actif) de Cayambe, le paysage agricole est développé sur des sols fertiles formés à partir des coulées volcaniques.

La géographie des sols en fonction des reliefs

Les sols varient, régionalement et localement, en fonction des reliefs. Il y a trois raisons à cela :

- l'altitude et l'exposition, qui influencent les climats locaux ; les îles volcaniques des Canaries et des Caraïbes en sont de beaux exemples : les variations climatiques induites par les reliefs font que se retrouvent, presque côte à côte, des sols équatoriaux, tropicaux, méditerranéens, tempérés... ;

- la pente, qui commande en partie l'importance relative des divers types de phénomènes d'érosion : arrachements à l'amont, sédimentation à l'aval, érosion en nappe, en rigoles, en ravins... (cf. chap. 4) ;

- les migrations latérales de matières à l'intérieur des couvertures pédologiques, qui donnent naissance à des systèmes pédologiques en toposéquences caractérisés, par exemple, par des appauvrissements en amont (en argile, en calcaire, en sels...) et des enrichissements en aval ; mais aussi par des hydromorphies en aval (morphologies dues à des excès d'eau) (cf. encadré 4).



15 Espagne – Îles Canaries, Ténériffe

Belles zonalités climatiques et pédologiques dues à l'altitude et à l'exposition du mont Teide, qui culmine à 3 718 mètres.

Les roches sont, pour la plupart, volcaniques basiques.

Au niveau de la mer, le climat est aride et semi-aride, de type méditerranéen : les sols sont fersiallitiques, associés à des Vertisols avec des accumulations de calcaire (et de sodium). En montant en altitude, selon les versants et les couverts forestiers, les sols deviennent soit fersiallitiques, de moins en moins calcaires, soit ferrallitiques (Nitissols). En haute altitude, on arrive aux Andosols.

La géographie des sols en fonction du temps

Dans un même paysage, les différentes surfaces – donc les sols – n’ont pas toutes le même âge. On trouve par exemple des surfaces où l’érosion est régulièrement active : les sols y sont donc en permanence rajeunis ; et, à proximité, d’autres surfaces où l’érosion est plus lente : les sols peuvent y prendre le temps de vieillir, de s’épaissir et de se différencier.

De même – autre exemple –, le long d’un fleuve se sont souvent accumulées, au cours des siècles et des millénaires, des alluvions formant des terrasses : ces terrasses sont d’autant plus élevées dans les paysages qu’elles sont plus anciennes. Leur étude montre que les couvertures pédologiques y sont d’autant plus évoluées que les terrasses sont plus anciennes.

Autour d’un volcan, on peut aussi constater que les sols changent d’une coulée à l’autre : changements partiellement dus à la nature des laves, mais aussi et surtout à l’âge des coulées.

Ainsi, retenons que nous avons toujours sous les yeux, dans un paysage donné caractérisé par son climat, ses roches et ses reliefs, plusieurs couvertures pédologiques qui sont en fait les diverses étapes d’une ou plusieurs histoires pédologiques : il s’agit de chronoséquences.



16 Maroc – Basse Moulouya (plaine du Zebra)
Paysage : chronoséquence de sols calcaires sur terrasses alluviales emboîtées

Les terrasses alluviales sont quaternaires :

- la plus ancienne (1) a un million d’années ;
- la plus récente (3) a quelques centaines d’années ;
- la terrasse (2) a quelques dizaines de milliers d’années.

Les sols sont à profil calcaire différencié :

ils sont calcaires et ils possèdent un horizon d’accumulation du calcaire Bca qui est d’autant plus développé que les sols sont plus vieux, donc situés sur des terrasses plus anciennes.

Steppe à armoise au premier plan.

La plupart des sols viennent d’être labourés superficiellement et semés en céréales.

Encadré 4

Attention, ne pas confondre différenciation et âge !

Un sol plus différencié verticalement n’est pas forcément plus vieux. De même, une séquence latérale très différenciée n’est pas forcément plus âgée.

En effet, certaines conditions de roches ou de relief ne favorisent pas la différenciation des sols :

- une roche marneuse, riche en argile et en calcaire, s’oppose à la genèse d’un sol très différencié ;
- au contraire, un grès acide, en climat océanique, donne rapidement naissance, en quelques dizaines d’années, à des sols très différenciés lessivés.

Une couverture pédologique peut être vieille de plusieurs millénaires tout en restant peu différenciée ; elle peut être jeune de quelques décennies et déjà très différenciée.

Les vitesses de différenciation des horizons et des systèmes pédologiques sont principalement fonction des climats, des roches et des reliefs. Les phénomènes sont plus rapides sous un climat chaud et humide que sous un climat sec ; ils sont plus rapides sur les roches acides que sur les roches basiques, sur les roches perméables que sur les roches peu perméables. Tout ira plus vite sur pente faible que sur pente forte, où l’érosion freine la différenciation.

Encadré 5

Quelques exemples de systèmes pédologiques

La mise en évidence des systèmes pédologiques exige la réalisation, sur le terrain puis en laboratoire, d'observations et de mesures nombreuses et détaillées, donc longues et coûteuses. Cela explique le retard pris dans la découverte des principaux systèmes pédologiques du monde : l'inventaire mondial des horizons et des superpositions verticales d'horizons (les types de sols) est à peu près réalisé ; mais celui des systèmes, c'est-à-dire de la réalité morpho-dynamique des couvertures pédologiques, reste à faire : on en aurait pourtant bien besoin, de toute urgence, pour optimiser l'utilisation durable des sols.

C'est dans les régions tropicales et équatoriales que se trouvent quelques-uns des systèmes pédologiques aujourd'hui les mieux connus (grâce aux travaux des chercheurs pédologues français, principalement de l'Orstom devenu IRD, en collaboration avec des chercheurs africains, brésiliens, australiens). Les résultats de ces travaux menés sous les tropiques ont incité les scientifiques à rechercher l'équivalent dans d'autres régions climatiques.

Quelques exemples de systèmes pédologiques en topo- et chronoséquences

■ **Systèmes associant des sols lessivés à l'amont et des Vertisols à l'aval** : en milieu tropical, sur des versants à pente faible, sur roches acides, la couverture pédologique est souvent lessivée à l'amont (présence d'un horizon E dont l'épaisseur diminue de l'amont vers l'aval) et elle est dominée par l'accumulation d'argile à l'aval : cela peut aller jusqu'à la formation, à l'aval, de Vertisols, très argileux, à argiles gonflantes. La mise en évidence de ces toposéquences tropicales a incité les pédologues méditerranéens à en rechercher – et trouver – l'équivalent dans diverses régions du pourtour de la

Méditerranée. Dans ces toposéquences, on trouve fréquemment des solonetz, situés entre les sols lessivés et les Vertisols : les dynamiques latérales des solutions drainant le sodium et la silice en provenance de l'altération des roches expliquent la formation des Solonetz puis des Vertisols.

■ **Systèmes associant, en milieu équatorial ou tropical humide, des Ferralsols très appauvris à des Podzols géants (de plusieurs mètres d'épaisseur) ainsi qu'à des sols hydromorphes (Gleysols) et à des tourbes (Histosols)**. L'ensemble de ce type de systèmes pédologiques est très appauvri en minéraux argileux. Dans ces systèmes, la dynamique principale est celle du remplacement des Ferralsols par les Podzols. L'Amazonie et de nombreuses régions forestières du monde équatorial sont largement concernées par ces systèmes et leurs dynamiques appauvrissantes.

■ **En milieu tempéré et méditerranéen, des systèmes équivalents au système Ferralsol-Podzol**, mais en beaucoup moins gigantesques, ont été mis en évidence : il s'agit de systèmes associant des sols non lessivés, moyennement différenciés, à des sols lessivés puis podzoliques.

■ **En milieu tropical**, on trouve des systèmes de sols acides au sein desquels l'accumulation du fer se construit et se détruit (formation et destruction de carapaces et de cuirasses).

■ **En milieux méditerranéen et tropical**, on observe des systèmes de sols calcaires au sein desquels l'accumulation du calcaire se développe, quantitativement et morphologiquement, de l'amont vers l'aval et des surfaces (terrasses alluviales) les plus jeunes vers les surfaces les plus anciennes.

Les « célébrités » pédologiques

La dénomination scientifique des sols représente un casse-tête loin d'être résolu. La difficulté principale vient de ce que « l'individu sol » n'est pas facile à délimiter.

Actuellement, le sol que l'on décrit, que l'on dénomme et que l'on tente d'insérer dans des classifications ou dans des référentiels plus ou moins artificiels est identifié à ce que l'on voit sur les parois d'un trou ou d'une tranchée, qui n'est en fait qu'un échantillon – souvent aléatoire – d'une couverture pédologique.

Les « individus sols » sont à rechercher ailleurs : au niveau des **horizons** et au niveau des **systèmes pédologiques**. L'inventaire mondial des horizons pédologiques est abouti ; celui des systèmes pédologiques reste à faire.

Pour l'instant, pour échanger sur les caractéristiques d'un sol, on en reste donc à la dénomination des « profils », c'est-à-dire à ce que l'on voit sur une coupe entre la surface et la roche-mère. Plusieurs classifications et référentiels existent. Le document international le plus en usage actuellement est le WRB, World Reference Base for Soil Resources : c'est ce langage WRB que nous employons dans ce livre quand une référence scientifique est nécessaire. Cependant les appellations « grand public » sont encore très utilisées, d'autant que le WRB les a souvent conservées.

Les sols cités ci-dessous sont parmi les plus connus, ce qui ne veut pas dire qu'ils correspondent à des images claires et uniformes !

Voici donc quelques « célébrités » pédologiques : célèbres par leur beauté ou par leur originalité, par leur fertilité, leur histoire, leurs relations avec les hommes... et leur importance dans l'histoire de la recherche pédologique. Nous les présentons ci-après en adoptant leurs noms traditionnels.



17 Ukraine – Chernozem

Chernozems : nom d'origine russe ; ce sont les sols des steppes continentales, très froides en hiver, chaudes en été ; ils sont noirs, moyennement différenciés, souvent formés sur lœss (limons périglaciaires quaternaires) ; horizon A épais (100 cm), sombre, finement structuré, saturé en calcium, riche en matière organique et en activités biologiques, très fertile ; faible accumulation de calcaire en profondeur ; c'est ce sol qui fut étudié, vers la fin du XIX^e siècle, par Dokuchaev, l'un des fondateurs de la pédologie. Dans la terminologie française, les chernozems font partie des **sols isohumiques**, caractérisés par une distribution profonde de la matière organique ; les Nord-Américains les appellent mollisols. En milieu méditerranéen, les sols isohumiques et les mollisols sont fréquents, sans que ce soit des chernozems ; ils sont fertiles.

Podzols : nom d'origine russe ; à l'opposé des chernozems, sols des steppes, les podzols sont des sols sous forêts, très différenciés, chimiquement pauvres, acides, et fortement appauvris en surface. Leurs couleurs sont noir organique, sur blanc sableux, sur ocre foncé organo-ferrique et aluminique, sur brun : cette succession très colorée des horizons des podzols est très photogénique et ils sont la « vedette » des documents pédo-pédagogiques. Les podzols ont d'abord été étudiés dans les régions forestières froides de l'hémisphère Nord. Plus récemment, l'existence de podzols géants a été mise en évidence



18 Allemagne – Podzol

dans les milieux tropicaux humides où ils se développent au détriment de sols ferrallitiques très appauvris.

Solonchaks : nom d'origine russe ; ces sols sont très riches en sels solubles, dès la surface. Ils sont en général situés dans des zones basses, là où des nappes phréatiques peu profondes drainent et concentrent des sels présents dans les roches. Ces sols sont particulièrement fréquents en climat aride et dans les plaines côtières. Ils sont difficiles à mettre en valeur. Des irrigations mal conduites provoquent fréquemment la genèse de solonchaks.



19 Maroc (Sahara) – Solonchak



20 Maroc – Solonetz

Solonetz : nom d'origine russe ; ces sols, souvent associés à des solonchaks, ne sont pas salés, mais l'ont été : ils en conservent une présence excessive de sodium sur le complexe adsorbant, d'où des argiles dispersées, qui migrent vers la profondeur, avec genèse d'un horizon lessivé E reposant sur un horizon d'accumulation d'argile et de sodium (BtNa) dont la structure prismatique, en colonnes à sommet arrondi, est caractéristique. Dans les milieux tropicaux et méditerranéens, les solonetz sont fréquemment présents dans des toposéquences associant des sols lessivés à l'amont et des

vertisols à l'aval (cf. encadré 5 concernant les systèmes pédologiques). Une morphologie défavorable (limite brutale entre les horizons E lessivés et les horizons d'accumulation d'argile et de sodium BtNa ; horizons BtNa peu poreux, difficilement pénétrables) et une chimie dominée par la présence du sodium font de ces sols des milieux peu accueillants pour l'agriculture.

Rendzines : nom d'origine polonaise ; il s'agit de sols peu épais et peu différenciés, calcaires, la roche-mère étant riche en calcaire ; l'horizon A est riche en matière organique. Quand les sols, tout en restant calcaires, deviennent plus épais, avec présence d'un horizon S (sol moyennement différencié), on parle de sols bruns calcaires. Rendzines et sols bruns calcaires sont fréquents en milieux

méditerranéens et tempérés, là où les roches sont riches en calcaire. L'érosion joue un rôle fondamental : c'est elle qui décide de la présence d'une rendzine (érosion forte) ou d'un sol brun calcaire (érosion plus faible). Souvent, le développement d'une agriculture favorisant l'érosion provoque en quelques années le développement de rendzines au détriment de sols bruns calcaires.



21 France (Charentes) – Rendzine

Rankers : nom d'origine allemande ; il s'agit de sols peu épais et peu différenciés, non calcaires, la roche-mère n'étant pas calcaire ; l'horizon A est riche en matière organique. Les rankers sont présents partout où les sols ont du mal à naître et à s'épaissir : roches difficilement altérables, pentes fortes, climats froids... Ce sont des sols peu fertiles, par eux-mêmes et du fait des conditions de milieu qui les entourent.

Vertisols : nom proposé par les Nord-Américains (*Soil Taxonomy*). Il s'agit de sols argileux, riches en minéraux argileux gonflants (smectites, montmorillonites...), de couleur sombre mais pauvres en matière organique. Leurs structures sont finement polyédriques en surface, puis prismatiques, puis en plaquettes obliques avec de nombreuses faces lissées (slickensides) : cette structure oblique est le résultat des mouvements internes provoqués par les changements de volumes qui se produisent à chaque fois que le sol s'humidifie (gonflement) ou se dessèche (fissurations).



22 Sénégal – Vertisol



23 Équateur – Andosol

© IRD/P. Podwojewski

Les argiles gonflantes ont deux origines principales :

- elles préexistent dans certaines roches sédimentaires où elles prennent naissance au moment de l'altération de certaines roches basiques ;
- elles se néoforment en milieu aval mal drainé à partir des éléments en provenance de l'altération amont qui libère des cations et de la silice.

Ces sols sont fréquents dans les milieux tropicaux, méditerranéens et continentaux. Ils sont physiquement difficiles à travailler mais chimiquement très fertiles et, de ce fait, souvent très recherchés par les agriculteurs.

Ces sols ayant « la bougeotte », il n'est pas recommandé d'y construire : ni bâtiments, qui se fissureront rapidement, ni routes, qui ne tarderont pas à se gondoler, ni enfouissement de câbles ou de tuyaux d'écoulement qui, à brève échéance, formeront des nœuds complexes !

Andosols : nom d'origine japonaise ; il s'agit de sols gris à noirs, peu à moyennement différenciés, formés sur des roches volcaniques récentes (cendres...) ; forte présence d'allophane (silicates mal cristallisés) et de matière organique. Ils sont mécaniquement instables : les horizons A et S peuvent se liquéfier sous l'effet d'une forte pression. Ces sols sont chimiquement riches : malgré les risques volcaniques, ils sont très recherchés par les agriculteurs.

Latérites : nom d'origine anglaise et géologique... qui ne veut plus dire grand-chose. Selon les cas, on attribue ce nom à tout ou partie des sols ferrallitiques (Ferralsols) (voir ci-après) : il peut s'agir de l'horizon inférieur d'altération hydromorphe (argile tachetée qui selon les auteurs durcit quand on le met à l'air libre...) ou d'un horizon d'accumulation d'hydroxydes de fer et d'aluminium (carapace ou cuirasse), dont on peut se servir pour construire routes et bâtiments.



24 Côte d'Ivoire – Latérite

Sols ferrallitiques (Ferralsols et Nitisols) : le sol ferrallitique est le roi des sols, très épais (plusieurs dizaines de mètres) ; mais c'est un « roi nu », très pauvre, couvert et protégé naturellement par des forêts ou des savanes biologiquement très riches, qui vivent de leurs propres ressources et de ce qui leur est apporté par l'atmosphère et les pluies. Le sol ferrallitique constitue, sous la forêt et sous la savane, une grande maison d'accueil, confortable... mais vide ; on peut y respirer, on peut y boire mais il n'y a rien à manger dès que l'on quitte les horizons de surface où se concentre l'essentiel de la



25 Brésil – Nitisol



27 Maroc – Sol fersiallitique



26 Brésil – Ferralsol

vie. Parmi les sols ferrallitiques, on trouve les **Nitisols** formés sur roches basiques : moins épais, ces sols sont plus accueillants pour la vie animale et végétale, les produits de l'altération des roches étant utilisables jusqu'en surface.

Sols fersiallitiques : ils représentent la « pépite d'or » des régions méditerranéennes subhumides et semi-arides : sols rouges, argileux (argile moyennement gonflante), non calcaires, riches en

matière organique, finement structurés dans l'horizon S (agrégats anguleux), riches en cations basiques, très fertiles... quand ils ne sont pas lessivés et/ou érodés. En milieu plus humide, ces sols s'appauvrissent en cations et en argile, avec apparition du couple d'horizons E (lessivé)-Bt (accumulation d'argile). Par ailleurs, les défrichements excessifs ont souvent provoqué de forts amincissements de ces sols. On les trouve également en milieu tropical, sur roches basiques.



23 France (Saône) – Sol lessivé dégradé

© P. Curmi

Sols bruns acides, sols bruns, sols bruns lessivés, sols lessivés, Planosols, sols lessivés dégradés... : ils constituent la séquence historique des sols les plus fréquents dans les régions tempérées, se formant sur roches acides et sur loess. Acidité et aluminium libre caractérisent les sols bruns acides (ce sont des sols peu différenciés, bien drainés) ; les sols bruns sont moyennement différenciés : ce sont les plus fertiles de la série ; le couple E-Bt (horizon lessivé sur horizon d'accumulation d'argile) se développe de plus en plus quand on va du sol brun lessivé vers le sol lessivé puis vers le Planosol ; dans ce dernier, la limite qui sépare les horizons E et Bt devient très nette, brutale, ce qui provoque des ruissellements latéraux à faible profondeur mais aussi des excès d'eau conduisant à des phénomènes d'hydromorphie et de dégradation (dissolution des argiles) : on arrive ainsi aux sols lessivés dégradés, peu fertiles, l'étape suivante pouvant être la podzolisation. Tous ces sols sont organisés entre eux dans les paysages selon des toposéquences et des chronoséquences.

Sols à carapaces et cuirasses ferrugineuses : ils sont fréquents dans les régions tropicales, en particulier en Afrique. L'érosion fait que les carapaces et les cuirasses, formées en profondeur, se retrouvent affleurantes et limitent considérablement la fertilité.



Sols à croûtes et encroûtements calcaires : ils couvrent des surfaces importantes en milieu méditerranéen steppique, semi-aride et aride. Ces accumulations calcaires limitent les potentialités de ces milieux. Dans les régions plus arides, on trouve également des sols à croûtes et encroûtements gypseux.

29 Maroc – Sol à croûte et encroûtement calcaires.



© IRD/J.-C. Leprun

30 Burkina Faso – Sol à carapace et cuirasse ferrugineuse.

Tourbes (3 à 4 millions d'hectares) : sols dominés par la matière organique accumulée en conditions d'excès d'eau. Les tourbes sont particulièrement fréquentes dans les régions équatoriales et tropicales humides – elles y constituent l'aval des toposéquences Ferralsols-Podzols – ainsi que dans les régions à climat froid et humide, où elles sont associées à des sols lessivés, à des Podzols et à des Cryosols. Les tourbes retenant beaucoup de carbone, elles sont aujourd'hui l'objet de beaucoup de soins, en particulier en Europe du Nord.



31 Irlande – Tourbes.

Cryosols (180 millions de km² = 13 % des surfaces de sols) : sols du futur pour l'agriculture ? Quand ils ne seront plus gelés – ce qui ne saurait tarder –, avec quelques conséquences graves comme la libération dans l'atmosphère de grandes quantités de carbone actuellement piégées, en particulier dans les sols tourbeux.



32 Norvège (Spitzberg) – Cryosol.

Le sol et ses fonctions





IRD/O. Barrière

Séchage des récoltes sur les toits des terrasses.
En arrière-plan, des champs cultivés –
Maroc, Haut Atlas

Le sol et ses fonctions

Les sols étant situés au carrefour entre lithosphère (les roches), atmosphère (l'air), hydrosphère (les eaux continentales) et biosphère (la vie), on peut facilement imaginer que les couvertures pédologiques non seulement dépendent de ces milieux, mais aussi qu'elles les influencent.

Par rapport à la Terre dans son ensemble et à la vie en général, par rapport aux hommes, à leurs besoins et à leurs activités, les sols remplissent de nombreuses fonctions, que l'on peut également qualifier de services.

Ils abritent une grande part de la biodiversité terrestre et jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement des écosystèmes ; ils sont ainsi à la source de services écosystémiques majeurs, parmi lesquels assurer la production végétale, nourriture de l'homme et de l'animal.

Mais les sols produisent aussi la biomasse nécessaire à la fabrication d'énergies (biocarburants) et de matériaux (bois, textiles...).

Les sols influencent l'écoulement et la composition des eaux continentales, ainsi que les cycles des éléments nutritifs et des polluants. Ils stockent du carbone, ou en libèrent dans l'atmosphère : ils participent ainsi à la régulation de l'effet de serre.

Ils sont de véritables archives de l'histoire des hommes et de la Terre.

Ils contribuent à l'élaboration permanente des reliefs.

Le sol accueille la vie

Le sol abrite une large part de la biodiversité terrestre : on estime qu'un quart des espèces actuellement décrites vivent dans le sol. Ainsi, la première des fonctions du sol, certainement la plus importante, est l'accueil de la vie : la vie fait le sol... qui à son tour permet à la vie de se développer, de se différencier, de se diversifier.

La vie fabrique les sols

La vie dans les sols, ce sont les plantes et leurs racines, bien sûr, mais aussi les milliards de bactéries, de champignons, de nématodes, de vers de terre, de termites, de fourmis, d'insectes et de lézards, de taupes, de marmottes, de lapins, de renards... La vie, qu'elle soit micro ou macroscopique, contribue à l'altération des roches, c'est-à-dire qu'elle participe à la désagrégation des roches, à la transformation et à la dissolution des minéraux primaires de ces dernières puis à la formation des constituants des sols

(argiles, hydroxydes...); à partir de ces constituants, la vie contribue à la construction, en permanence renouvelée, des structures pédologiques (agrégats, nodules, porosités...).

Une grande partie de la morphologie des sols résulte du travail d'« équipes »

vivantes, qui associent des communautés végétales et animales : par exemple, l'essentiel de la porosité des sols est en permanence construite et reconstruite par les activités biologiques, qui contribuent ainsi à la régulation des flux hydriques et gazeux qui utilisent les vides.



France – Languedoc

La vie contribue à l'altération des roches, donc à la formation du matériau sol. Parallèlement, la vie met à sa propre disposition les constituants minéraux qui lui sont nécessaires !

Encadré 1

Les micro-organismes dans les sols

Parmi le monde vivant des sols, les micro-organismes sont les plus nombreux et les plus divers. Il s'agit, principalement, de bactéries et de champignons (un gramme de sol peut accueillir 10 000 espèces bactériennes et un milliard de bactéries).

Les fonctions de ces micro-organismes sont nombreuses : en particulier, ils dégradent les matières organiques et mettent des nutriments à la disposition des plantes ; l'azote, par exemple, dont l'accès aux racines est facilité par la présence de champignons et de bactéries, qui vivent en association étroite (symbiose) avec les racines.

Par ailleurs, les micro-organismes dégradent les polluants, mais aussi contribuent à l'émission, par les sols vers l'atmosphère, de gaz à effet de serre (gaz carbonique CO_2 , oxydes d'azote N_2O , méthane CH_4).



© IRD/T. Jouquet

2 Brésil – Amazonie

Les vers de terre sont au double service de la structuration des sols et de leur enrichissement en nutriments minéraux.

Encadré 2

Les vers de terre et autres invertébrés, bâtisseurs des sols

Vers de terre, termites, fourmis... : ils sont des travailleurs de la terre infatigables. Ils creusent, ingurgitent, transportent, transforment. Agrégation et porosité des sols sont par leur action en permanence renouvelées. Ils transforment les matières organiques pour les rendre plus disponibles. Par les galeries et par les agrégats poreux qu'ils fabriquent, ils facilitent la pénétration profonde des eaux, des gaz, des nutriments, des racines.

En milieu tropical, les quantités de terre ingérées annuellement par un peuplement de vers peuvent atteindre 2 600 tonnes par hectare et par an, soit l'équivalent d'une couche de 20 cm de terre. Sachant que, comme pour d'autres caractéristiques des sols, les biodiversités morphologiques et comportementales des invertébrés des sols sont en étroites relations avec les pédodiversités.

Les matières organiques contribuent à la formation des sols

Au cours de leur vie sur et dans les sols, puis à leur mort, les êtres vivants laissent dans les sols des matières organiques dont les fonctions constructives (agrégats, vides), nutritives (azote, cations retenus sur le complexe adsorbant : calcium,

potassium...) et accumulatives (carbone) sont essentielles. L'un des rôles des organismes vivant dans les sols est de faire évoluer les matières organiques « fraîches », végétales et animales, issues de la mort, pour les rendre disponibles aux sols et accessibles à la vie, pour continuer à la nourrir. Ainsi le sol accueille la vie et remet à sa disposition les résidus de la mort.

**3** France – Morvan

Sur et dans les sols, les vivants et les morts se côtoient et se succèdent. Ici, sous forêt, une litière formée sur le sol est composée pour l'essentiel de matériaux végétaux morts, en cours de transformation par le travail de millions d'insectes, de champignons, de bactéries. Ainsi la vie se nourrit-elle de la mort. Les produits minéraux et organiques de l'évolution de la litière s'incorporent dans l'horizon sous-jacent : c'est aussi le travail de nombreux êtres vivants.

Le sol a la double capacité d'assurer la diversité des habitats et celle des aliments.

Les sols offrent à la vie un accueil diversifié

Si le sol accueille la vie, c'est bien parce qu'il a la double capacité d'assurer la diversité des habitats et celle des aliments : cela à partir des constituants issus des roches-mères, des eaux de pluie, de l'atmosphère et de la vie elle-même. D'une part, il offre, à différentes échelles d'organisation, une grande diversité morphologique d'habitats, de niches écologiques (il s'agit, en particulier, de la diversité morphologique des porosités : taille et forme des vides, auxquelles les êtres vivants savent s'adapter) ; d'autre part, à l'échelle de ces habitats, le sol contient et rend disponibles ou indisponibles, selon les cas, les éléments nutritifs nécessaires à la vie, ou périlleux pour elle. Le sol conserve sous forme inassimilable les éléments minéraux en excès, qu'il libère et rend disponibles au fur et à mesure des besoins : il s'agit là des fonctions « garde-manger », « gestion des stocks », « barrages aux éléments toxiques », jouées par les acteurs vivants agissant sur les constituants minéraux.

Le sol, par la diversité de ses structures et de ses constituants, représente donc à la fois un immense logis « multiplexe » et un garde-manger dont la taille, le

remplissage et l'accessibilité sont fonction de ses caractéristiques pédologiques. Cela veut dire également que les diversités biologiques sont fonction des pédodiversités, morphologiques et physico-chimiques.

Les sols contribuent aux cycles de l'eau et de l'atmosphère

Les sols régulent au quotidien les flux hydriques et gazeux. Ils interviennent sur les écoulements superficiels des eaux continentales vers les nappes et les rivières. Ils échangent avec l'eau et l'air des constituants minéraux et organiques.

Quelques chiffres permettent de prendre conscience de l'importance des relations entre pédosphère, atmosphère et hydrosphère :

- à chaque instant, un tiers du volume des eaux douces continentales se trouve dans les sols ;
- les sols renferment deux à trois fois plus de carbone que l'atmosphère ; ils en contiennent autant voire plus que la végétation ; ils contribuent ainsi à limiter l'effet de serre ;
- les sols gelés arctiques conserveraient environ l'équivalent de la moitié du carbone présent aujourd'hui dans l'atmosphère terrestre : le réchauffement

en cours de la Terre libère ce carbone qui contribue à l'accroissement du réchauffement...

Le sol est un « réservoir » en eau qui permet de répondre régulièrement aux besoins des plantes et des animaux. Son influence sur les ressources et les transferts d'eau est significative. En effet, les eaux accumulées dans les nappes phréatiques ainsi que celles qui circulent dans les rivières ont préalablement traversé les sols en cheminant dans leurs porosités. Les comportements hydrologiques et chimiques des nappes et des rivières (niveau des nappes, ruissellements, crues, pollutions...) sont donc influencés par les porosités des sols : par exemple, une agriculture qui entraîne le développement en surface d'un horizon peu poreux (croûte de battance, tassement...) favorise le ruissellement : l'eau, au lieu de pénétrer dans le sol, d'y être retenue pour les besoins à venir des plantes et des animaux, puis d'alimenter la nappe phréatique, ruisselle vers les rivières en provoquant sur son passage érosion, coulées de boue, crues, inondations.

Par ailleurs, la composition chimique et biochimique des eaux de source reflète la chimie des parois des vides empruntés par les eaux pour traverser les sols : l'eau qui migre dans un vide échange des éléments minéraux et organiques avec les parois de ce vide ; ainsi se transmettent des pollutions : une eau polluée laisse sur les parois des vides des sols qu'elle traverse des constituants minéraux

et organiques qui pollueront les eaux suivantes : le sol dépollueur devient ainsi pollueur...

De même, les échanges gazeux sont permanents entre les sols et l'atmosphère qui y est présente. L'atmosphère, au contact avec les constituants des sols, s'appauvrit ou s'enrichit en carbone, en azote, etc.

Le sol se comporte donc comme un filtre et comme un régulateur des flux hydriques et gazeux. Il a par ailleurs la capacité de stocker l'eau et de la rendre à la vie au fur et à mesure des besoins.

Bien entendu, dans le détail, les capacités des sols en matière de régulation des cycles des eaux et des gaz varient en fonction des propriétés des sols eux-mêmes : nature des constituants, morphologie des horizons, des agrégats, des vides, des limites...

De même, selon les situations, le sol stocke ou libère du carbone ou de l'azote : par exemple, en Europe, les sols sous forêt et sous prairie, ainsi que les sols des zones humides, retiennent du carbone ; en revanche, les sols labourés en agriculture intensive libèrent du carbone et de l'azote sous forme de gaz à effet de serre (gaz carbonique, méthane, oxyde d'azote).

Le sol est à la fois un réservoir et un filtre.

Encadré 3

Les sols, puits et sources de carbone

Au niveau mondial, il y a dans les sols deux à trois fois plus de carbone que dans l'atmosphère ; il y en a autant, voire plus, dans les sols que dans la végétation terrestre.

Selon les climats, les couvertures végétales, les situations topographiques, les sols renferment plus ou moins de carbone ; par exemple, les tourbes en retiennent des quantités importantes (ce sont des puits), que leur exploitation par l'homme relâche dans l'atmosphère (le puits devient source). D'une façon générale, les sols des zones humides sont des pièges à carbone.

L'agriculture intensive, avec labour, est consommatrice de matières organiques : elle libère dans l'atmosphère des quantités importantes de carbone. Des pratiques plus douces, remises en œuvre depuis quelques années, ayant pour but l'enrichissement des sols en matières organiques (non-labour, maintien sur place des résidus de récolte, couverture végétale permanente, amendements organiques...), piègent du carbone.

L'urbanisation intensive des sols ralentit, voire rompt leurs relations avec l'atmosphère : le sol ne peut plus jouer son rôle de puits de carbone.

La présence de matières organiques dans les sols est donc doublement bénéfique : pour leur fertilité (morphologique, chimique, biologique) et pour freiner l'enrichissement de l'atmosphère en gaz à effet de serre.

Les sols dépollueurs et pollués

On parle de pollution du sol quand il y a excès par exemple de métaux lourds et que cet excès devient toxique pour le développement vital d'un ou plusieurs maillons du monde vivant, dans le sol, mais aussi dans l'eau et dans l'air en contact avec le sol.

À notre époque, la majeure partie des pollutions qui atteignent les sols sont d'origine anthropique : utilisation excessive d'engrais (excès d'azote et de

phosphore) et de pesticides ; retombées des fumées industrielles et automobiles, épandages excessifs de déchets agricoles, industriels, urbains... Cependant, il ne faut pas sous-estimer l'existence de « pollutions naturelles » : en effet, dans les résidus que sont les produits de l'altération des roches, des métaux lourds, présents dans les roches en faible quantité, peuvent se concentrer dans les sols et devenir dangereux pour la vie.

Parmi les métaux lourds utiles en faible quantité pour le développement des végétaux et des animaux, citons le bore,

le cuivre, le nickel... ; présents en trop grande quantité, ils deviennent polluants. Parmi les métaux lourds particulièrement dangereux, il faut encore citer le mercure, le plomb, l'arsenic...

Les sols peuvent digérer, épurer, dégrader une partie des déchets issus des activités humaines.

Les multiples activités biologiques dont ils sont le lieu, associées aux propriétés des constituants et des structures pédologiques, en font des « usines » de traitement de déchets (agricoles, urbains, industriels). L'activité biologique dégrade les déchets épandus dans et sur les sols. Les produits minéraux et organiques de cette dégradation sont soit lessivés, soit retenus au sein de la porosité du sol (en particulier sur le complexe adsorbant), soit re-consommés par l'activité biologique, en particulier au niveau de la rhizosphère, lieu de rencontre pour le transfert vers la plante des éléments minéraux préparés par les « amis » bactéries et champignons : c'est le rôle fertilisant de certains déchets (composts).

La réussite de la dépollution dépend beaucoup de l'intimité qui s'établit ou non entre les porosités pédologiques, les racines en développement, les symbioses avec les bactéries et les champignons. On ne peut donc pas tout traiter de la même façon : selon les caractéristiques minéralogiques, structurales, biologiques, organiques des couvertures de sols, selon les conditions climatiques et topographiques locales, selon les caractéristiques

physico-chimiques et biologiques des déchets..., on a vite fait de dépasser les quantités d'épandages acceptables et de passer ainsi du compost fertilisant au déchet pollueur, de transformer le sol épurateur en sol pollueur. Chaque sol peut contribuer, en fonction de sa nature et de sa situation, au traitement de certains déchets ; mais tout excès d'épandage réduit, voire détruit, ses capacités.

Les sols fournissent aux hommes nombre de matériaux essentiels

Pour le bâtiment et l'industrie (argiles, graviers, sable, pierres), mais aussi pour le chauffage (tourbes), les sols fournissent des matériaux. Ils sont en outre source de minerais, usuels ou précieux (fer, aluminium, or...), dont l'homme fait aussi des usages artistiques (céramique, peinture, maquillage...).

La diversité des matériaux d'origine pédologique

L'une des caractéristiques de la genèse des sols est d'aboutir à la formation de concentrations mono-minérales : il s'agit d'horizons qui se forment au sein des sols, soit par accumulation absolue d'un ou plusieurs éléments, soit, plus souvent, par enrichissement relatif (il



© C. Mathieu

4 Togo – Lama Kara

Une cuirasse ferrugineuse en cours de démantèlement : cette concentration de fer (souvent accompagnée d'aluminium) s'est formée au sein du sol à quelques mètres de profondeur. L'érosion des horizons supérieurs l'a ensuite progressivement ramenée vers la surface, où l'activité biologique s'emploie aujourd'hui à la détruire. Ces concentrations de fer, quand elles sont éloignées de la surface (à quelques mètres de profondeur), sont souvent peu consolidées : ce sont alors des « carapaces » avec lesquelles on peut fabriquer des briques, qui durciront à l'air libre.



Il y a concentration d'un ou plusieurs constituants suite au départ des autres constituants).

Il en résulte ainsi, sur de grandes surfaces :

- dans les régions tropicales, des carapaces et des cuirasses ferrugineuses et aluminées, formées au sein des sols par migration et par concentration relative dues au départ de la silice. Ce sont à la fois des minerais et des matériaux de construction (maisons, routes...) ;

- dans les régions méditerranéennes, des croûtes et des dalles calcaires, souvent utilisées pour construire des bâtiments. Ces horizons se forment par accumulation absolue de calcaire qui vient remplacer les silicates préexistants (il y a épigénie, c'est-à-dire, dans ce cas, dissolution des minéraux silicatés et remplacement de ces minéraux par de la calcite) ;

5 Togo – Lama Kara

De la roche au village, via le sol : la roche-mère est du basalte.

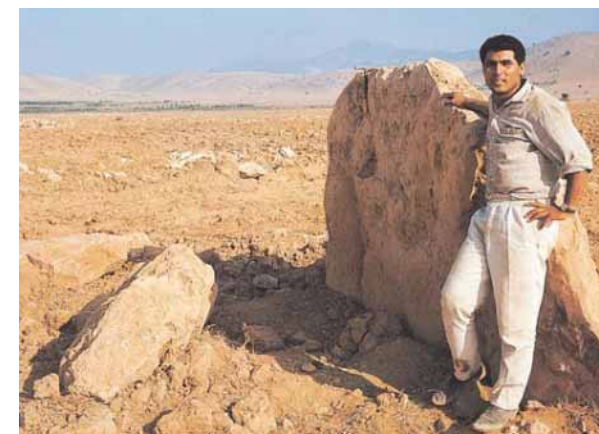
Le sol qui prend naissance à partir de cette roche est argileux, bien drainé (d'où la couleur rouge), finement structuré.

Il comporte un horizon d'accumulation de fer (cuirasse : voir photo 4 ci-dessus) dont on voit des blocs résiduels à la surface.

Ce sol, parce qu'il est argileux sans être gonflant, est utilisé comme matériau pour construire les maisons et les greniers du village.

La cuirasse peut également être utilisée.

Sur cette photo, on remarque la couleur rouge foncé de l'horizon superficiel du sol, la continuité de cette couleur entre la surface du sol et les murs des bâtiments du village, ainsi que des blocs de cuirasse ferrugineuse en cours d'altération.



6 7 Maroc oriental

En haut :

Croûtes et dalles calcaires : horizon d'accumulation de calcaire, formé au sein d'un sol de région aride.

En bas :

Une tentative de destruction de cet horizon (par labour profond = défoncement) a ramené à la surface du sol des morceaux de dalle qui constituent alors un bon matériau de construction.

– dans les régions tropicales, d'épais horizons à forte teneur en argile (kaolinite). Cette argile se forme après dissolution des silicates de roches éruptives ou métamorphiques, suivie du lessivage d'une partie de la silice. Ces « terres » riches en argile sont très utilisées pour construire des habitations dont l'audace architecturale est souvent étonnante. En fait, des horizons argileux, moins épais, sont également fabriqués dans les sols des régions à climat tempéré et méditerranéen ; et les hommes y construisent aussi en « terre ». On estime qu'un tiers de l'humanité habite des maisons en « terre », extraite des sols où elle a été fabriquée. Et, depuis fort longtemps, les matériaux argileux sont également utilisés pour la céramique, pour le maquillage... et pour l'expression culturelle et religieuse ;

– dans les régions froides et humides et dans les régions équatoriales, sur roches acides, des concentrations de sables siliceux. Ce sont des horizons dans lesquels les hydroxydes de fer et d'aluminium ont été lessivés par la podzolisation (cf. chap. 2) ; associées aux podzols, de fortes accumulations de matières organiques donnent naissance à des tourbes (qui accumulent de grandes quantités de carbone et sont fréquemment utilisées comme combustible) ;

– dans les horizons lessivés de sols développés sur roches éruptives ou métamorphiques, on peut découvrir des concentrations d'or : ce minéral, présent dans la roche-mère, se concentre dans les



8 Sénégal – région de Mako

Une femme à la recherche de particules d'or travaille à l'aide d'une batée. La terre prélevée pour être lavée est puisée dans des trous profonds qui atteignent l'horizon d'altération où l'or se concentre.



9 Burkina Faso

Habitat lobi traditionnel fait de moëllons de terre séchée jointés avec de l'argile.



10 Madagascar – Région de Sakaraha

L'argile est utilisée pour les soins de beauté et le maquillage.



11 Côte d'Ivoire – Korhogo

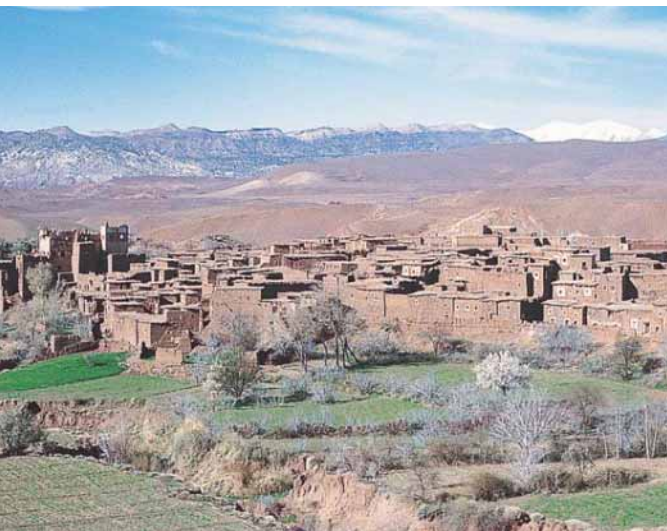
Poteries destinées aux usages du quotidien.

horizons lessivés car il résiste à l'altération et au lessivage qui éliminent les autres constituants ;

– dans les milieux arides et désertiques, les concentrations fréquentes à la surface des sols sont celles de gypse (croûtes gypseuses), de sels solubles (chlorures et carbonates), de cailloux (reg), dues à l'érosion éolienne des particules fines.

Ainsi, un grand nombre des matériaux dont les sociétés humaines ont besoin pour vivre et se développer se forment dans les sols et résultent de processus pédogénétiques. D'où des concurrences et des conflits entre les utilisateurs des sols, en particulier dans les périphéries urbaines où les besoins en matériaux sont importants : les bonnes terres agricoles risquent d'être gignotées.

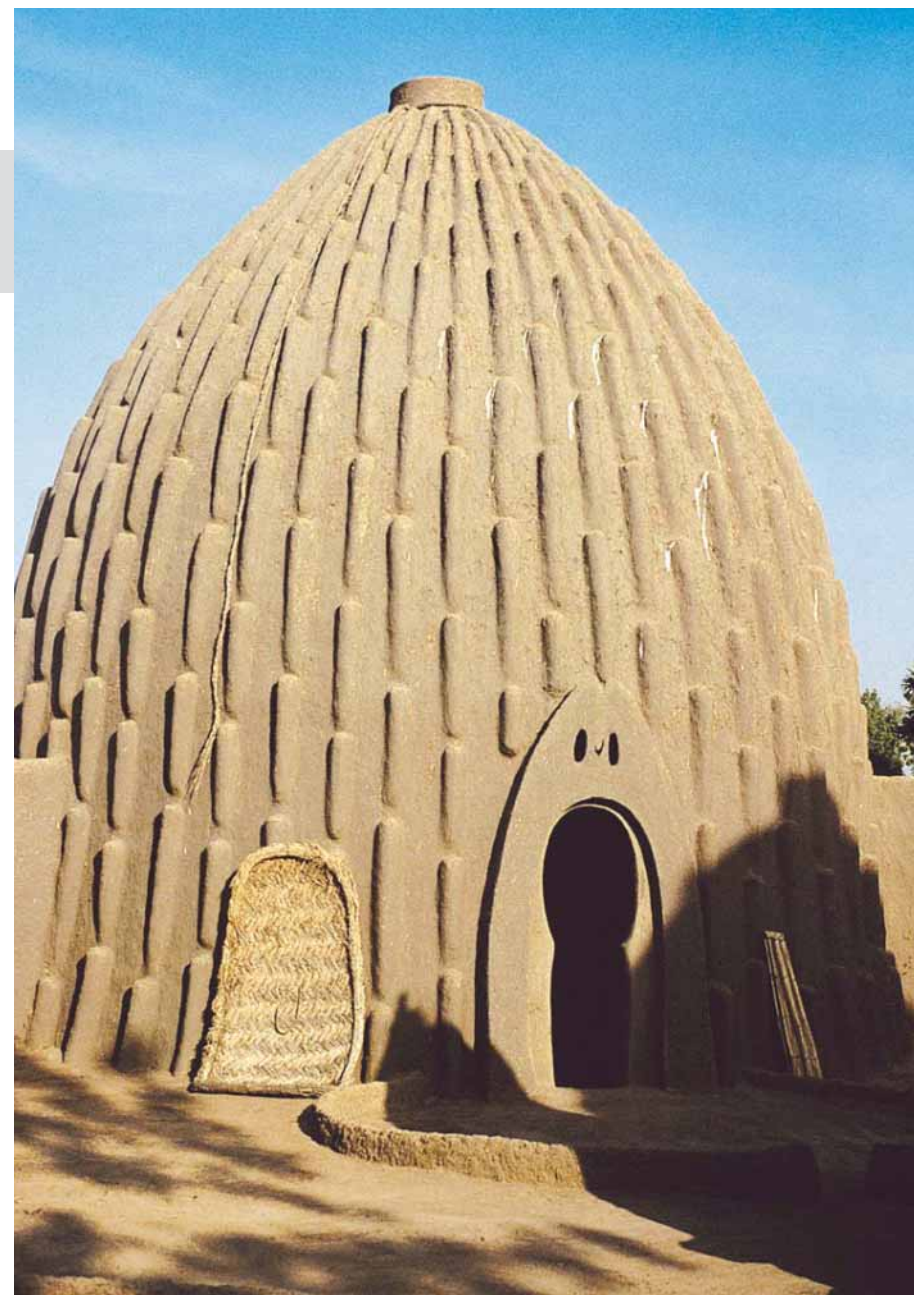
Outre les activités agricoles et forestières, les sols supportent, sur des surfaces toujours plus importantes, nombre de constructions : villes, industries, infrastructures de transport... qui viennent fortement perturber les fonctions biologiques, alimentaires, hydrologiques et atmosphériques des couvertures pédologiques. Or, tous les sols ne sont pas aptes à supporter des constructions : il n'est pas bon, par exemple, de construire sur des sols contenant beaucoup d'argiles gonflantes ; les bâtiments risquent de bouger, de « danser »... De même, tous les sols ne sont pas à même d'être utilisés pour n'importe quelle pratique agricole (cf. chap. 5).



Diversité et prouesses architecturales des constructions en terre

12 Maroc – Telouet (Haut Atlas)

Harmonie des couleurs : le village fortifié est construit avec les matériaux extraits des sols.

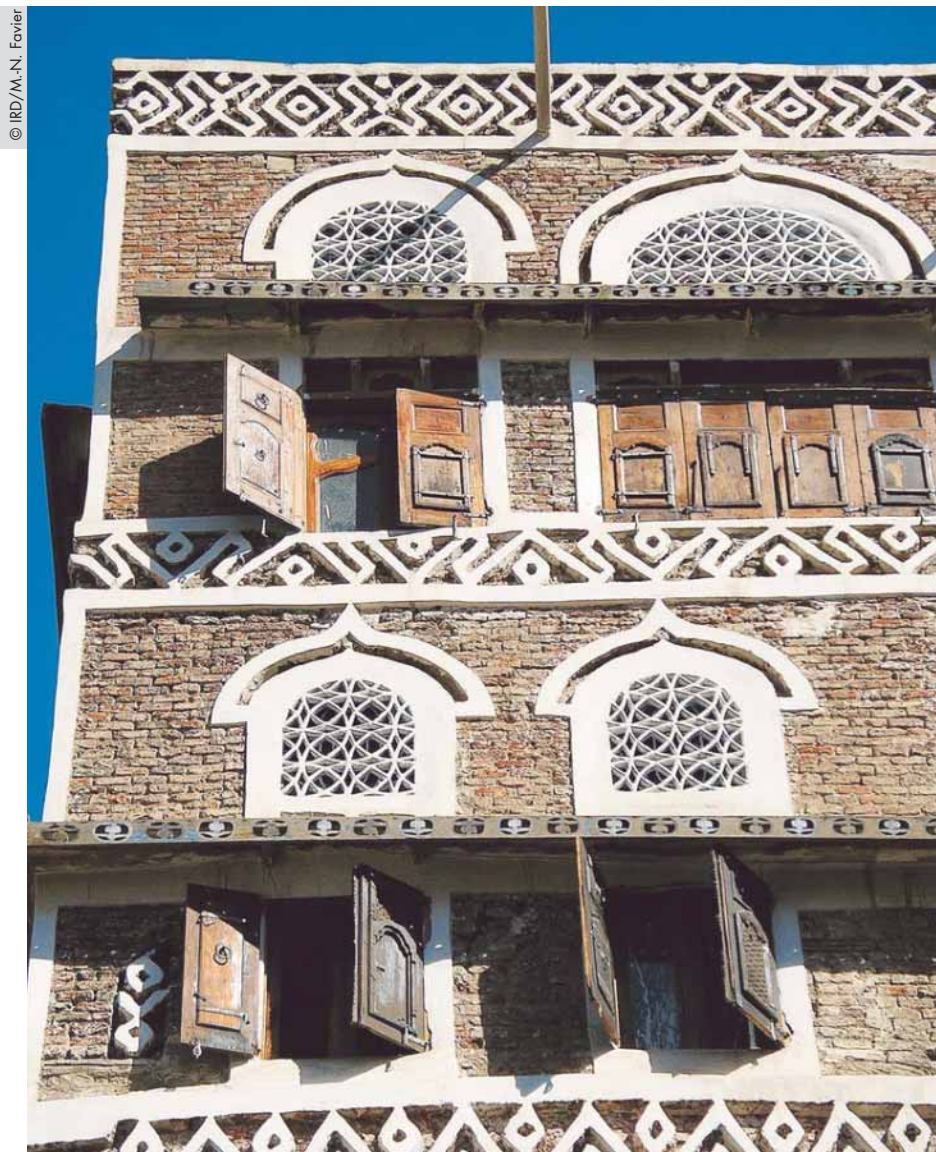


13 Bolivie – Département de Cochabamba

À 3 900 m d'altitude, une chapelle construite en adobe (briques de boue séchée).

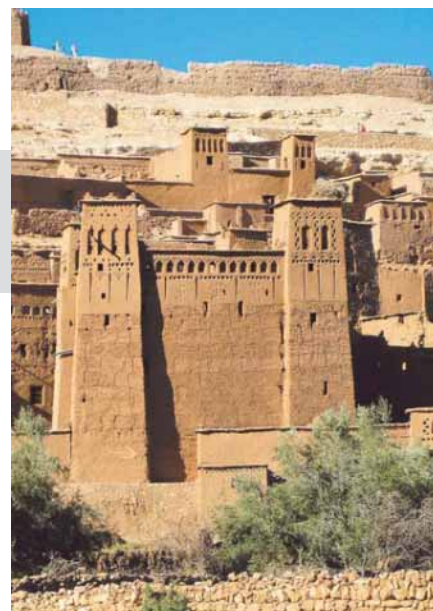
14 Cameroun – Pouss

Une case obus.



15 Yémen – Sana'a

Architecture traditionnelle de maisons-tours construites en briques de terre.



16 Maroc – Vallée du Draa, au sud de l'Atlas

Ksars : villages fortifiés où l'on habite et où l'on stocke les réserves alimentaires. La construction en terre de ces ksars exige que les parois soient très régulièrement entretenues pour éviter les dégradations dues aux rares pluies. Aujourd'hui, beaucoup de ksars sont à l'abandon.



17 Mali

Village dans le delta intérieur du Niger.

Les sols, archives du passé de l'homme et des écosystèmes

Les sols conservent, dans leurs constituants et dans leur morphologie, de nombreux témoins de leur histoire et de l'histoire des milieux au sein desquels ils se sont créés.

Histoire des sols et des écosystèmes

Les différenciations successives (cf. chap. 1), les fronts de transformations, laissent des traces utiles pour reconstituer non seulement l'histoire des sols eux-mêmes mais aussi celle des climats, des végétations, des reliefs... et des hommes.

Ces traces consistent en éléments minéraux dont la composition varie avec le climat, en restes biologiques, débris végétaux et animaux, témoins de la composition des environnements passés. Ces reconstitutions sont à établir avec prudence, en tenant compte des multiples relations dynamiques qui existent entre les sols et leurs milieux. Les horizons les plus superficiels, du fait qu'ils sont les plus « résiduels » (cf. chap. 2), recèlent les témoins et les traces les plus résistants de l'histoire des sols.

Histoire des hommes

Les traces historiques sont nombreuses au sein des sols, témoins de millénaires de présence humaine. On y retrouve

enfouis toutes sortes de vestiges de la vie quotidienne, mais aussi des traces morphologiques des activités agricoles, des plus anciennes aux plus récentes, ainsi que des traces de guerres entre les

peuples. Là encore, les interprétations ne sont pas simples : les phénomènes de pédoturbation (mouvement et mélange des matériaux), de bioturbation (mouvements liés aux activités biologiques) et

d'érosion étant continus, l'interprétation des positions géographiques et des datations doit être menée avec grande prudence.



18 Bolivie – Lac Titicaca

Anciennes terrasses incas, en bordure du lac. Ces terrasses peuvent encore être utilisées.



© IRD/L. Emperaire

19 Brésil – Amazonie

Un exemple d'extractivisme : exploitation de la fibre de *Piassaba*, utilisée pour fabriquer des balais. La coupe se fait en respectant les rythmes naturels de reproduction. En choisissant la voie de l'extractivisme (cueillette), on se donne pour objectif de vivre des ressources du milieu forestier tout en respectant les vitesses de renouvellement de ce que l'on prélève (fruits, sève, bois, écorce, fleurs...).

On peut, à titre d'exemple, citer les progrès réalisés en Amazonie, depuis quelques années, dans la connaissance des occupations humaines du passé. En particulier, la découverte et l'étude des *terras pretas dos Indios* (les terres noires des Indiens), horizons pédologiques de couleur sombre, chimiquement et archéologiquement très riches, révèlent que ces terres noires sont la marque d'une importante occupation humaine, qui disparut au XVI^e siècle avec l'arrivée des Européens.

L'étude pluridisciplinaire de ces sols noirs d'origine anthropique permet de découvrir comment s'est nouée, il y a quelques siècles, voire millénaires, l'association étroite entre les hommes et la forêt : on estime à plusieurs millions le nombre de personnes qui vivaient en Amazonie avant l'arrivée des Européens. Aujourd'hui, l'abondance et la richesse des *terras pretas dos Indios* et les sociétés humaines qui les ont élaborées pèsent fortement sur les débats concernant l'avenir des forêts et des hommes en Amazonie. L'alternative actuelle oppose la destruction des forêts – très riches, que l'on remplace par l'agriculture et l'élevage, considérablement plus pauvres – à la préservation contre toute utilisation anthropique des richesses. Or on peut maintenant proposer une troisième voie, celle de l'occupation des forêts par des sociétés humaines vivant des ressources forestières auxquelles s'ajoutent des ressources agricoles produites au sein de la

forêt sur des sols que l'on prend le temps d'améliorer. Cette voie, l'extractivisme, est aujourd'hui de plus en plus souvent choisie et mise en œuvre.

Sols et cultures, sols et religions

Les sols et les hommes, la terre et les hommes : ce sont des relations fortes... mais en perte de vitesse tout au long du XX^e siècle.

Toutes les cultures et les religions accordent au sol – à la terre – une grande importance. C'est la terre qui donne la nourriture ; c'est la terre que l'on utilise pour construire ; c'est de la terre que l'on extrait de quoi se peindre le visage et le corps ; la terre permet de sculpter, de dessiner, de peindre... mais aussi de se soigner. La volonté des hommes est donc – disent-ils – de respecter la terre... Cependant, la réalité est tout autre ! Trop souvent la terre, le sol sont peu respectés par les hommes. En particulier au cours du XX^e siècle, la course à la production agricole et à l'urbanisation a éloigné les hommes du « respect » de leurs sols. La connaissance scientifique sur les sols s'est considérablement développée, mais les principaux utilisateurs des sols n'en ont guère tenu compte, involontairement pour la grande majorité, qui n'a pas accès aux résultats scientifiques, mais souvent volontairement pour ce qui est

des ingénieurs, des techniciens, des aménageurs, qui considèrent que tenir compte des sols et de leur diversité leur implique la vie !

En ce début de XXI^e siècle, les dirigeants et les éducateurs (enseignants, animateurs associatifs) semblent se réveiller : ils prennent conscience, tout doucement, que nourrir 9 milliards d'humains en 2050 ne se fera pas sans une très sérieuse prise en compte de la réalité du milieu sol et des relations entre les sols et les sociétés. Cela nécessite la sensibilisation de tous, ce qui ne sera possible qu'en s'appuyant sur les diversités et les spécificités culturelles des relations sols-hommes : il n'y a pas de démarche unique d'éducation au sol.

Les sols contribuent à l'élaboration permanente des reliefs

La tectonique est l'acteur numéro 1 de la genèse des reliefs. Elle détermine, dans les hautes chaînes de montagne, les altitudes, la mise en place des roches les unes par rapport aux autres, l'importance des dénivelés, et c'est sur ces matériaux que l'altération, la pédogenèse et l'érosion travaillent conjointement pour donner naissance à des sols et à des reliefs adoucis.

Si côte à côte les reliefs sont différents sur un granite et sur un calcaire compact,

cela tient non pas aux roches elles-mêmes, mais aux caractéristiques des sols qui prennent naissance sur ces roches. C'est pour cette raison que les reliefs sur roches équivalentes ne sont pas les mêmes quand on change de région climatique : si le relief sur un granite n'est pas le même en milieu tempéré et en milieu tropical, c'est parce que les sols formés sont différents, et donc les changements de volumes et les phénomènes d'érosion diffèrent eux aussi.

Plusieurs phénomènes pédologiques majeurs contribuent à la genèse des reliefs :

- la formation du matériau sol à partir de la roche qui s'altère. Au cours de cette fabrication interviennent des changements importants de structures, avec un fort développement des porosités ; cela provoque des abaissements différenciés de la surface, variables selon les roches, les pentes ;

- le développement, au sein de certains sols, d'horizons compacts, durcis, peu poreux, qui, d'une part, vont conduire les eaux à circuler latéralement, d'autre part, vont résister à l'érosion. Des plateaux prennent naissance, protégés par les horizons compacts. C'est le cas, par exemple, des plateaux cuirassés (fer) d'Afrique tropicale, que l'on retrouve jusque dans le Sahara ; c'est aussi le cas des croûtes calcaires méditerranéennes ;

- les phénomènes d'altération par épigénie qui homogénéisent la surface ;



20 Mauritanie – Sahara

Sols et reliefs : plateaux cuirassés, résistant à l'altération donc à l'érosion. La cuirasse (de fer) s'est formée à l'intérieur du sol, sous climat plus humide. Les horizons supérieurs du sol ont été érodés, ramenant vers la surface la cuirasse qui marque le relief.

– les concentrations en surface, par érosion différenciée, des cailloux ayant résisté à l'altération ; ces minces couvertures caillouteuses empêchent l'érosion de se poursuivre.

Sols et reliefs se forment en même temps, conjointement. Il n'y a pas genèse du relief puis des sols ; les sols ne se forment pas sur et en fonction d'un relief préexistant.

La tectonique soulève les reliefs et relance, accélère les phénomènes d'altération, de drainage, de pédogenèse et d'érosion. Pendant le calme post-tectonique, la pédogenèse prépare les matériaux et les différenciations pédologiques sur lesquels l'érosion va travailler pour aplanir les reliefs.



*Sols et reliefs se forment,
en permanence,
les uns en fonction des autres.*

21 Maroc – Anti Atlas

La pédogenèse (formation des sols) est moteur de la formation d'un relief en glacis.

La structure sédimentaire des roches (alternance de couches plus ou moins argileuses et sableuses, calcaires et non calcaires) est recoupée par la surface plane, régulière, du relief (glacis). Sous la surface du versant (glacis), le sol est latéralement homogène et cela malgré l'hétérogénéité des roches sédimentaires recoupées par le versant.

Le sol est constitué de deux horizons principaux : un horizon supérieur brun-rouge (1), qui se forme par altération et décarbonatation de l'horizon sous-jacent ; un horizon inférieur blanc (2), d'accumulation de calcaire qui se forme par altération de la roche sous-jacente et par accumulation latérale de calcaire. Cette accumulation de calcaire se réalise avec remplacement des minéraux de la roche sédimentaire : il y a épigénie.

Il y a donc : altération de la roche sédimentaire ; transport latéral de calcaire, par l'eau et par le vent ; accumulation de calcaire à la base de l'horizon d'altération : cette accumulation de calcaire (horizon 2, blanc) se fait avec épigénie des minéraux des roches sédimentaires, dont l'hétérogénéité est ainsi effacée ; formation de l'horizon 1, à partir de l'horizon 2, par décarbonatation : l'horizon 2 ayant effacé les hétérogénéités de la roche, l'horizon 1 est homogène ; enfin érosion superficielle homogène, donnant naissance au glacis très régulier.



22 Maroc – Anti Atlas

On note ici la belle régularité des versants en forme de glacis sombres qui recourent des roches de dureté diverse.

Au premier plan, une tranchée met à jour des poches de sols rouges développés à partir d'un grès. La surface des roches qui affleurent est noircie par des phénomènes d'oxydation du fer :

c'est la formation du vernis du désert.

On remarque que, sans la tranchée, ouverte pour la construction d'une route, la couleur rouge du sol est invisible.

On sait par ailleurs que cette couleur rouge n'est pas présente dans tous les sols de ce versant : les sols rouges ne sont présents que sur grès et sur calcaires compacts ; sur argiles et marnes, les sols sont bruns : mais ces variations latérales des couleurs des sols, en fonction des roches, sont masquées par le vernis du désert qui se développe sur tous les cailloux concentrés à la surface.



23 Maroc – Anti Atlas

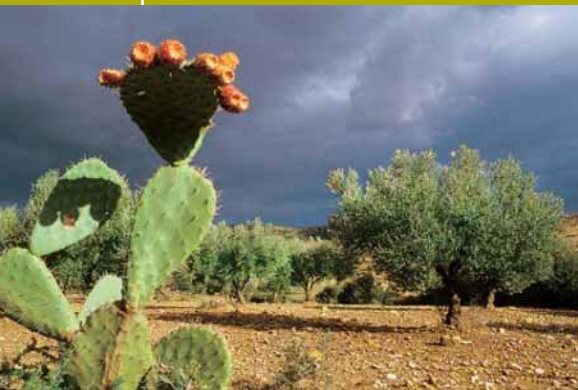
Autoprotection des sols contre l'érosion : étonnant, ce paysage aride où le couvert végétal du sol est faible, dispersé, et où pourtant on ne décèle que peu de traces d'érosion violente.

La roche, blanche, n'est pas calcaire ; le sol est rouge, argileux, d'une épaisseur significative (de l'ordre du mètre). Le sol ici s'autoprotège : il est recouvert de cailloux blancs, ayant la même couleur que la roche. Ce couvert caillouteux, résiduel de l'altération de la roche, est né à la suite de l'érosion des particules fines : une fois formé, ce couvert caillouteux bloque la poursuite de l'érosion.

Mais attention, danger si l'on y touche : la construction de la route déclenche des reprises d'érosion.

Les sols en danger





IRD / V. Simonmeaux

Figuier de barbarie
et oliviers sur ciel d'orage – Tunisie

Les sols en danger

L'histoire des sols avant l'homme a été totalement différente de l'histoire de ces 10 000 dernières années.

Hommes et sols : des relations vitales mais conflictuelles

Depuis 10 000 ans, c'est-à-dire depuis les tout débuts de l'agriculture, l'homme accentue progressivement sa présence sur Terre, sa pression sur l'ensemble des milieux et des ressources : d'abord doucement, puis de plus en plus rapidement, de plus en plus violemment, en particulier pour ce qui est des sols.

Depuis 10 000 ans, les hommes défrichent, coupent, brûlent. Ils ont abandonné la cueillette, ils labourent et sèment, ils apportent des amendements et des engrais, ils irriguent... Ils construisent aussi des villes, des routes, des usines... Au total, ils génèrent, sans y prêter une attention suffisante, des modifications importantes de la biosphère, de l'atmosphère, de l'hydrosphère et de la pédosphère : les sociétés humaines ont ainsi modifié les sols mais aussi les conditions de l'évolution de ces derniers. L'histoire pré-anthropique des sols fut en effet totalement différente de l'histoire de ces 10 000 dernières années.



© IRD/M. Grimaldi

1 Brésil – Amazonie

En Amazonie, le défrichement de la végétation naturelle s'est accéléré depuis une cinquantaine d'années : défrichement aveugle destiné à remplacer une immense et productive biodiversité par une agriculture peu diversifiée puis par l'élevage bovin extensif. Le massacre atteint les sols qui perdent leur fertilité structurale, organique, minérale. Partout dans le monde, les défrichements, sans nuance, des couverts végétaux et l'intensification non diversifiée de l'utilisation agricole des sols se poursuivent sans que l'on s'interroge sur les alternatives envisageables.

Pourrait-on essayer de faire autrement ?
Doit-on tout détruire pour produire l'alimentation et pour répondre aux autres besoins des hommes ?

Ce n'est que depuis peu que les sociétés humaines commencent à prendre conscience des risques engendrés par cette situation : dans de nombreuses régions, le sol a été abandonné au triste sort de simple support du rural et de l'urbain.

Scientifiquement, la prise de conscience moderne de la nécessité de connaître les sols et d'y faire attention date du XIX^e siècle. Cependant, tout au cours du

XX^e siècle, priorité fut donnée à une production agricole de plus en plus intensive, sans prendre garde aux destructions que cela entraînait : il fallait



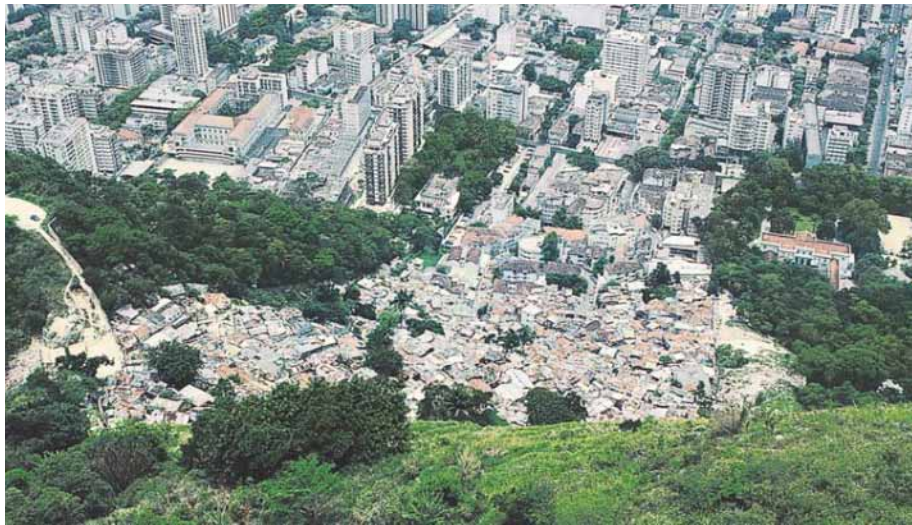
© M. Dosso

2 France – Montpellier

L'extension des villes, des autoroutes, des zones industrielles... se fait en oubliant la diversité des sols et de leurs fonctions. En France, les sols ne sont pas pris en compte pour l'établissement des plans d'occupation ... des sols ! Biodiversité et sols en sont les principales victimes. En France, on estime à 60 000 hectares la surface de sols qui, chaque année, disparaît sous le béton : 600 000 hectares en dix ans, soit la surface d'un grand département français.



3 Algérie – Oran



4 Brésil – Rio de Janeiro



5 Brésil – Belo Horizonte

À Oran, le front d'urbanisation se déplace en envahissant les plaines fertiles qui furent à l'origine de la création de la ville.

Mais l'urbanisation envahit aussi les collines périphériques. Soit on laisse faire : c'est le cas, par exemple, des *favelas* (bidonvilles) de Rio de Janeiro, qui s'accrochent à des versants qui sont à tout moment menacés par les glissements de terrain (il y a des morts tous les ans) ; soit on prévoit et on planifie : on entreprend alors (voir Belo Horizonte) des travaux souvent gigantesques, des terrassements qui meurtrissent les sols, et qui souvent sont faits trop vite, sans tenir compte des diversités pédologiques. Ces aménagements provoquent alors de fortes déstabilisations des versants : ruissellements, érosion, glissements de terrain, inondations, « coulées de boue »...

En France, on estime à 60 000 hectares la surface de sols qui, chaque année, disparaît sous le béton : 600 000 hectares en dix ans, soit la surface d'un grand département français.

produire à tout prix, pour nourrir le monde disait-on, mais aussi pour nourrir les marchés... Priorité aussi à une occupation urbaine, industrielle, routière, tentaculaire, qui s'est souvent développée sur les sols les plus fertiles. On a ainsi épuisé, voire détruit, des centaines de milliers d'hectares de sols et autres milieux naturels, sans penser aux lendemains...

Ce n'est que récemment, depuis la fin du XX^e siècle, que les attitudes ont commencé à changer... lentement. Aujourd'hui, le sentiment prédomine que les « dégâts » sur les sols et les milieux auxquels ils sont associés sont « considérables ».

Mais qu'entend-on par « considérable » ? Comment distinguer ce qui est grave de ce qui l'est moins ? Comment reconnaître ce qui est réversible et ce qui ne l'est pas ? Comment chiffrer les baisses de fertilité agricole et leurs conséquences ? Comment évaluer les coûts des changements hydrologiques (crues, pollution) et atmosphériques (accumulation des gaz à effet de serre), ainsi que les coûts des phénomènes d'érosion et de leurs conséquences... ?

Un fait inquiétant : aujourd'hui, la destruction des sols va plus vite que leur construction

Quand on voyage en Europe à l'époque des labours, un fait intrigue dans le paysage : la couleur des surfaces labourées est changeante ; elle n'est pas uniforme, elle n'est plus uniforme... Un peu partout en effet, on voit apparaître dans les champs labourés des surfaces plus claires, comme une « lèpre blanche » qui

s'accroît d'année en année. Or, en y regardant de plus près, on s'aperçoit que les zones labourées plus claires correspondent à des remontées vers la surface, par le travail du labour, d'une terre plus claire située en profondeur : en admettant que, sur une parcelle donnée, la profondeur du labour reste la même d'une année sur l'autre, et qu'elle est partout la même sur la parcelle, cela signifie que, d'année en année, les horizons superficiels A, organo-minéraux, de couleur plus sombre, se sont amincis ; il s'agit là du travail sournois de l'érosion qui, dans certaines zones cultivées, va maintenant plus vite que la formation des sols, et en particulier que la reconstruction pédogénétique de l'horizon A. Cet exemple illustre la gravité de la situation : aujourd'hui, un peu partout dans le monde, la destruction des sols va plus vite que leur construction ; si on n'y est pas très attentif, cette destruction n'est pas toujours visible et quand la « lèpre » apparaît en surface, il est alors souvent déjà trop tard pour réagir : car cela veut dire que l'horizon A, le plus fertile du sol, s'est déjà sérieusement aminci.

*La destruction des sols cultivés
va plus vite
que leur construction...*



© M. Dosso

6 France – Provence

La « lèpre blanche » fait apparaître les surfaces où l'érosion va le plus vite : les ruptures de pente convexes, les hauts de versants, les sommets d'éperons... Le plus souvent, les zones claires correspondent à l'affleurement d'horizons calcaires (horizons S ou Bca ou C), normalement situés au-delà d'une quarantaine de centimètres de profondeur : ils sont rapprochés de la surface par l'érosion et par le labour.

Suite au défrichement et à la mise en culture, l'horizon A du sol s'appauvrit très vite (en quelques années) en matières organiques et en activités biologiques. Il s'ensuit la destruction des agrégats, des migrations d'argile, verticales et latérales, la fermeture partielle des porosités, le développement de tassements : les eaux de pluie ruissellent et l'érosion se développe.

En France, les estimations de l'Inra (Institut national de la recherche agronomique) sont les suivantes : vitesse moyenne de formation des sols = 0,1 à 0,02 mm par an ; érosion moyenne = 1 mm de sols par an.

Cependant, ces chiffres varient beaucoup selon les roches-mères, les climats, les reliefs, les couverts végétaux, les pratiques agricoles...

Tous les sols sont modifiés par l'homme

Pendant des millions d'années, depuis que la vie existe sur les continents, les sols se sont formés naturellement, sous l'action de l'eau, de l'air, de la vie animale et végétale. Ils se sont formés différemment selon les climats, les roches, les reliefs (cf. chap. 2). Ils se sont différenciés en fonction du temps. Ils se sont épaissis selon les vitesses relatives de l'altération des roches et de l'érosion des surfaces.

L'arrivée de l'espèce humaine et surtout l'essor de l'agriculture, de l'urbain, de l'industrie ont tout changé : l'homme est rapidement devenu le principal agent de la formation et de l'évolution des sols. Et très récemment, au cours du XX^e siècle, tout s'est encore accéléré.

En effet, maintenant, à l'échelle mondiale, les activités humaines modifient les climats (températures) et les compositions chimiques de l'atmosphère et des pluies : on peut en conclure que tous les sols du monde, fortement dépendants des climats, de l'air et des pluies, sont influencés et en cours de changement : il n'y a plus, nulle part, de sols « naturels », non anthropisés, non influencés par les activités humaines.

Plus localement, les défrichements des forêts et des steppes, l'intensification de l'agriculture, l'urbanisation, l'industrialisation, le développement des transports, l'accroissement des épandages de déchets..., tout cela agit sur les sols et les transforme.

Quand l'homme prend soin des sols, il les améliore

Les agriculteurs ont souvent su améliorer la fertilité des sols auxquels ils avaient accès ; ils ont su les protéger contre l'érosion ; ils ont su aménager des sols là où il n'y en avait pas.

En Amazonie, les « terres noires de l'Indien » (cf. chap. 3) représentent un exemple important de la capacité des hommes à élaborer une fertilité agricole tout en assurant le renouvellement de la forêt, dont ils ont besoin pour se nourrir, se soigner, se loger, s'exprimer.



France – Cévennes
Aménagement des sols en terrasses.

Là où les pentes sont trop fortes et, de ce fait, les sols sont trop minces, les hommes ont souvent réalisé des travaux gigantesques de mise en terrasses avec le double objectif d'empêcher l'érosion et de permettre l'irrigation.

Tout autour de la Méditerranée, mais aussi un peu partout en Asie, les hommes ont su, autre exemple, aménager en terrasses de cultures les sols peu épais des pentes fortes (cf. chap. 5).

Et on peut encore citer les polders néerlandais, les bocages bretons, les grands

périmètres irrigués des régions arides, mais aussi les apports d'amendements organiques et minéraux : ce sont autant d'exemples des efforts faits par les hommes pour protéger et améliorer les sols dont ils ont besoin pour vivre.

Quand l'homme force les sols, il les abîme

Au XX^e siècle, en quelques années, des sols agricoles très riches, tels les chernozems (les terres noires) d'Ukraine, se sont appauvris biologiquement, organiquement, minéralement, avec genèse en surface d'horizons fortement lessivés. En quelques années aussi, dans les champs, les structures superficielles en agrégats se détruisent,



© M. Dosso

10 France – Gers

L'irrigation est souvent indispensable pour couvrir les besoins des cultures. Encore faut-il savoir l'utiliser sans excès. En effet, deux dangers principaux guettent les sols irrigués : le compactage des horizons, soumis à l'alternance répétée « trop d'eau-pas assez d'eau » et la salinisation des horizons de surface consécutive à l'évaporation de l'eau d'irrigation. Ici, l'irrigation d'un sol argileux a créé en surface un horizon très compacté ; le labour de cet horizon donne naissance à de grosses mottes très denses.

ce qui mène à la formation de pellicules imperméables qui gênent le développement des plantes et favorisent le ruissellement des eaux de pluie, donc l'érosion : ces phénomènes sont courants dans le monde entier, en particulier partout là où les sols s'appauvrissent en matières organiques.

Autre phénomène inquiétant, le tassement superficiel, conséquence d'une mécanisation trop lourde (tracteurs, remorques) utilisée dans des conditions d'humidité

des sols inadaptées ; ce tassement provient aussi très souvent d'une mauvaise gestion des pâturages (par l'effet du piétinement du bétail). Ces tassements non seulement gênent les activités biologiques, mais ils perturbent aussi la circulation de l'eau, ce qui entraîne :

- une augmentation importante de la circulation latérale de l'eau dans le sol ;
- donc moins d'eau disponible vers les fronts d'altération des roches (l'altération en est ralentie) ;



8 9 Maroc oriental aride

Souvent, si les sols se voient dans un paysage, c'est parce qu'ils ne vont pas bien :
 – on les voit parce que, suite à l'usage agricole, leur porosité superficielle est en partie détruite, fermée aux échanges hydriques et gazeux (par le tassement et par la présence d'une pellicule formée par la destruction des agrégats), ce qui gêne le développement de la végétation et favorise le ruissellement de l'eau, donc l'érosion ;
 – et surtout on voit les sols justement parce qu'ils sont victimes de déchirures, d'arrachements de leurs couches superficielles, voire du sol tout entier : on les voit parce que l'érosion les blesse.

Encadré 1

Quelques-unes des principales dégradations des sols dues aux activités humaines**■ Dès que l'homme défriche puis cultive, il provoque dans les sols des modifications significatives :**

- d'une part, appauvrissement et transformation de la diversité biologique ; d'autre part, baisse des teneurs en matière organique ; ces phénomènes concernent tout d'abord les horizons A, puis gagnent toute l'épaisseur du sol ;
- il s'ensuit des modifications structurales, principalement de l'horizon A de surface : diminution de l'agrégation et de la stabilité des agrégats ainsi que de la porosité (avec formation, en surface, de pellicules peu perméables = battance) ; il peut y avoir aussi des tassements, des semelles de labour ; tout ceci porte atteinte au bon développement des systèmes racinaires et à la circulation de l'eau, qui devient plus latérale et plus superficielle ;
- appauvrissement en nutriments (consommation par les cultures) et en particules fines argileuses (érosion et lessivage des particules qui ne sont plus agrégées) ;
- accélération, selon les situations topographiques, de l'érosion (arrachement) ou de l'enfouissement (sédimentation) par les produits de l'érosion en provenance des amonts (cf. encadré 2) ;
- développement aval des excès d'eau, donc des conditions hydromorphes.

Ces dégradations sont pour la plupart difficilement évitables. Elles sont aggravées par le fait que les hommes ne se donnent ni le temps ni les moyens de tenir compte, quand ils les utilisent, de la diversité des sols. Cependant, beaucoup de ces dégradations sont réversibles : on peut favoriser la reconstruction, rapide (en quelques dizaines d'années), des horizons A (teneurs en matière organique, agrégation, porosité).

Nous l'avons déjà dit (cf. chap. 2) : le matériau sol, qui naît de l'altération des roches, se fabrique lentement ; il est lentement renouvelable ; mais nombre de constituants et de morphologies naissent, disparaissent puis renaissent, de façon permanente et répétée : le sol peut être alors considéré comme rapidement renouvelable.

■ Quand l'irrigation est mal conduite (excès d'eau, drainage insuffisant) :

- les **modifications structurales** des horizons de surface sont encore plus importantes ;
- la **salinisation** (accumulation de sels solubles) et l'**alcalinisation** (accumulation de sodium sur le complexe adsorbant) se développent, ce qui peut conduire le sol vers la stérilité.

■ La croissance de l'**urbanisation** et de tout ce qui l'accompagne (complexes industriels, réseaux de transports, parcs et terrains de sport, barrages...) condamne à l'**enfouissement**, à la **destruction**, des surfaces considérables de sols : il s'agit souvent de sols de qualité qui avaient justifié, lors de leur création, l'installation des cités. Par ailleurs, la grande majorité des cités et des voies de communications se développent sans tenir compte de la diversité des sols : il en résulte que les meilleurs sols agricoles ne sont pas protégés, mais aussi que l'on néglige les propriétés des sols pour construire de façon durable. Enfin, la pollution des atmosphères urbaines se répercute sur les sols urbains et péri-urbains.

■ Les **pollutions** des sols, qui peuvent se transmettre à l'eau, à l'air, aux plantes et aux divers ensembles biologiques qui y sont présents, ont plusieurs origines :

- l'épandage excessif de déchets d'origine agricole (lisiers), urbaine, industrielle ;



© IRD/C. Hartmann

11 Thaïlande

Casiers de riz irrigués en saison sèche : les taches blanches salines apparaissent en surface de manière irrégulière.

- l'utilisation abusive d'engrais, d'amendements, de pesticides ;
- la proximité d'émetteurs de gaz polluants (industries, autoroutes...).

Parmi les polluants les plus fréquents, on peut citer des métaux lourds (cuivre, plomb, cadmium...), des nitrates et des phosphates.



© IRD/V. Simonneaux

12 Maroc – Haut Atlas

Les cascades d'Ouzoud après un orage : les sols développés sur roches sédimentaires rouges du Permo-Trias sont très sensibles à l'érosion. On les retrouve dans les rivières puis dans les lacs de barrage qu'ils viennent envaser.

- mais davantage d'eau ruisselant en surface ;
- donc des phénomènes d'érosion amplifiés ;
- une forte augmentation de la violence des crues de fleuves et de rivières ;
- davantage de transport de sédiments par les rivières en crue.

Destruction des structures et des porosités, tassements superficiels et sub-superficiels (genèse de « semelles » de labour), appauvrissements biologiques, organiques et minéraux, modification des voies de circulation hydriques... Tout cela conduit à l'accélération de l'érosion (cf. encadré 2) qui peut prendre des allures catastrophiques : arrachements à l'amont, coulées d'eaux boueuses, sédimentations à l'aval. Cette érosion atteint les horizons les plus riches ; elle conduit à rapprocher de la surface les horizons plus profonds, qui sont moins fertiles.

L'érosion accélérée des sols est certainement le phénomène le plus grave en matière de dégradation anthropique des couvertures pédologiques. Parce qu'elle traduit d'autres dégradations qui la précèdent et la provoquent (appauvrissements biologiques et organiques, déstructuration, tassement...) et parce qu'elle peut être

*L'érosion accélérée des sols :
un phénomène grave...
et significatif...*

mortelle : l'érosion en ravines telle qu'on la voit se développer un peu partout dans le monde (*voçorocas* du Brésil, *lavakas* de Madagascar, *rills* d'Afrique du Sud...) est meurtrière pour les couvertures pédologiques ; elle menace les champs mais aussi les zones urbaines.



13 Brésil – État de São Paulo

Au premier plan, on voit que la surface du sol est lisse : la porosité de la surface du sol est fermée (c'est le résultat de la destruction des agrégats par les gouttes de pluie). Pour faciliter la germination des plantes, mais aussi la pénétration des pluies à venir et donc pour alimenter les plantes et empêcher le ruissellement superficiel et l'érosion, l'agriculteur effectue un labour peu profond... qu'il faudrait recommencer après chaque pluie ! La solution réside dans le développement à la surface du sol cultivé d'une couche enrichie en matières organiques, qui assure à la fois la protection contre l'impact direct des gouttes de pluie et l'amélioration des stabilités structurales.

Sinon, ruissellement et érosion se développent très vite et très fort.

Origine, développement et conséquences d'une érosion en ravines



L'érosion en ravines est très destructrice : elle touche les champs cultivés, les pâturages, les constructions urbaines...

© IRD/P. Brabant



15 Viêt-Nam

De toute part, des plantations sont menacées par l'érosion sous l'effet de la déforestation et du surpâturage.

14 Brésil – État de São Paulo

Une « voçoroca », développée en quelques années.



16
17 Brésil – État de São Paulo

Des constructions urbaines, planifiées (lotissements) ou non, sont directement menacées par les voçorocas (ravines) dont la naissance et le développement accéléré sont en partie dus à l'imperméabilisation des sols provoquée par l'urbanisation elle-même. Les sols sont ferrallitiques (ferralsols).

Encadré 2

L'érosion accélérée des sols : un phénomène grave et significatif

Si les sols sont visibles dans un paysage, c'est souvent parce qu'ils ne vont pas bien :

- on les voit parce qu'ils sont tassés, compactés, ce qui gêne le développement de la végétation ;
- on les voit surtout parce qu'ils sont victimes de déchirures, d'arrachements de leurs horizons superficiels, voire du sol tout entier : on voit les sols parce que l'érosion les blesse.

La source de l'érosion est double : par action de l'eau qui ruisselle parce qu'elle est empêchée de pénétrer dans le sol et par action du vent.

Érosion : arrachement, transport et dépôt de particules et d'agrégats de sol, le dépôt pouvant être proche ou lointain.

L'érosion liée à l'eau qui s'écoule de temps en temps à la surface du sol est un phénomène normal : l'épaisseur d'un sol est le résultat de la différence entre, d'une part, la vitesse de formation du sol à sa base (vitesse de l'altération des roches) et, d'autre part, la vitesse de l'érosion superficielle.

Dans les régions à climat tempéré ou méditerranéen, sous végétation naturelle forestière ou steppique, l'épaisseur des sols s'établit à quelques dizaines de centimètres, voire 1 ou 2 mètres ; c'est une bonne épaisseur, qui permet à l'activité biologique de bien se développer tout en restant en contact avec la roche-mère du sol, roche qui, en s'altérant, nourrit la vie.

Cependant, dans les régions à climat tropical humide, l'altération des roches est beaucoup plus rapide ; l'érosion n'ayant pas alors une vitesse suffisante, les sols atteignent plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur et sont de ce fait très appauvris en éléments nutritifs dans leurs horizons supérieurs.

L'érosion des sols est donc nécessaire pour que la vie reste en relation avec une partie importante de ses sources nutritives, qui proviennent de l'altération des roches.

Cela dit, dès que l'homme intervient, en particulier par le biais de l'agriculture et des pâturages, il modifie les conditions de circulation des **eaux** dans et sur les sols : les porosités superficielles diminuent, le ruissellement des eaux de pluie en surface s'accroît... L'érosion s'accroît en s'attaquant d'abord aux horizons de surface riches en activités biologiques et en matières organiques. Les sols s'amincissent dangereusement,

les produits de l'érosion vont se déposer à l'aval des pentes, puis dans les ruisseaux, les fleuves, les lacs... les mers et les océans.

Par ailleurs, dans les régions à saison sèche accentuée, les structures superficielles des sols desséchés s'effritent ; le vent peut alors s'en donner à cœur joie pour arracher les particules argileuses, limoneuses, sableuses qui vont envahir l'atmosphère, souvent très haut et très loin.

Enfin, érosion hydrique veut dire aussi **sédimentation** à l'aval des éléments arrachés à l'amont. Cette sédimentation est la chance de certaines régions : les alluvions qui, à chaque crue, se déposent sur les basses terrasses et dans les deltas des grands fleuves constituent la richesse principale des peuples agricoles qui s'y sont installés ; le delta du Nil en Égypte en est l'un des meilleurs exemples.

Mais la sédimentation entraîne aussi les glissements de terrain ravageurs ainsi que les dépôts qui accompagnent les inondations et envahissent les maisons et les magasins des villages : tous les ans, en France, des « coulées boueuses » se produisent avec érosion des champs et dépôts dans les cités.

Dans les régions désertiques et leurs pourtours, l'érosion éolienne est accompagnée de la formation de dunes qui, à plusieurs reprises, recouvrent puis découvrent les sols, les végétations, les habitats humains.



© C. Mathieu

19 Burundi

Un glissement de terrain ravage une plantation de bananiers

La pédogenèse crée à l'intérieur des sols des différenciations structurales importantes qui modifient les propriétés mécaniques des couvertures pédologiques par rapport à leur roche-mère. Par ailleurs, les horizons pédologiques ont chacun des comportements mécaniques spécifiques et des discontinuités porales prennent naissance au niveau des limites qui séparent les horizons les uns des autres.

Tout cela peut conduire les sols à des comportements périlleux : en particulier, suite à des événements pluvieux excessifs, des glissements de terrain peuvent se produire brusquement : les horizons supérieurs, trop rapidement engorgés, « coulent » le long des pentes ; ils peuvent aussi glisser au niveau des plans structuraux qui séparent les horizons.

*Tout cela coûte...
mais combien ?*

Quelles conséquences sur l'ensemble de la Terre ?

La transformation anthropique de l'ensemble des sols du monde est une réalité, qui se traduit par des modifications importantes des autres milieux :

- la biosphère se modifie et s'appauvrit ;
- l'atmosphère se pollue et s'enrichit en gaz à effet de serre (gaz carbonique, méthane, oxydes d'azote...) ; en conséquence, les climats changent ;
- l'hydrosphère : le cycle de l'eau devient plus violent et se raccourcit ; les eaux se polluent ; au total, l'eau se raréfie pour les besoins humains.

Globalement, la fertilité des milieux et des sols, par rapport aux activités humaines et par rapport à la vie en général, se modifie : certains milieux s'enrichissent, la plupart s'appauvrissent, cela pouvant conduire à l'abandon provisoire, voire définitif, de grandes surfaces de terres et à la migration de populations. Les réfugiés « pédologiques » existent ; ils fuient les régions où les sols dégradés ne peuvent plus les nourrir : c'est le cas en Afrique des régions tropicales sahéennes, où il y a conjonction entre les appauvrissements

organiques, biologiques, structuraux, minéraux et la sécheresse climatique ; c'est le cas également de la salinisation de grands périmètres irrigués, tel ceux de l'Ouzbékistan (Mer d'Aral).

Tout cela coûte... mais combien ? La dégradation des sols et ses conséquences sont rarement prises en compte dans le bilan économique et social de la « mise en valeur » d'une région.

En Bretagne, la politique agricole menée depuis les années 1970 avec suppression du bocage, développement de la culture du maïs-grain peu adapté au climat local, extension excessive des élevages hors-sol producteurs de lisiers (porcs, volailles), cette politique a provisoirement enrichi pendant quelques années ceux parmi les agriculteurs qui ont pu résister à l'expulsion de leur terre pour des raisons économiques ; mais elle a appauvri le capital naturel dont dispose l'ensemble de la société, rurale et urbaine : ces appauvrissements se manifestent sous la forme de pollutions par les nitrates de toutes les nappes phréatiques, d'eutrophisation des milieux côtiers (prolifération des « algues vertes »), de diminution de la biodiversité, de tassement puis d'érosion des sols. Tout cela coûte cher (mais combien ?) et est supporté par l'ensemble de la société, présente et future. Cela n'a pas empêché de reproduire, quelques années après, les mêmes erreurs : aujourd'hui, en Alsace, on détruit le bocage en milieu limoneux pour y développer une agriculture intensive



© IRD/F. Sodter

20 Burkina Faso – Mare d'Oursi

Vent de sable déplaçant des quantités importantes de matériaux (particules et micro-agrégats) arrachés aux sols.

inadaptée. Et cela recommence : fermeture des porosités, ruissellements superficiels, genèse de coulées boueuses qui envahissent les villages... et étonnement des autorités techniques, administratives et politiques...

En Amazonie, autre exemple, le remplacement de la forêt par une agriculture inadaptée se traduit aussi par un appauvrissement considérable, et difficilement réversible des sols : on constate de fortes diminutions des teneurs en matière organique, qui s'évapore dans l'atmosphère sous la forme de CO₂ ou de méthane, contribuant ainsi au réchauffement climatique ; il y a aussi lessivage très rapide des faibles teneurs en nutriments minéraux ; il y a encore appauvrissement biologique, érosion... Les sols étant très épais, il faut du temps pour les faire disparaître ; mais les premières années d'érosion portent atteinte aux horizons supérieurs les plus riches, voire les détruisent. Un calcul économique est donc à faire : ces pertes en « capitaux naturels », ces appauvrissements en grande partie irréversibles doivent être comptabilisés. On ne peut pas continuer à évaluer et à chiffrer les avantages et les inconvénients du remplacement de la forêt par des zones cultivées et des zones d'élevage sans y inclure les pertes en richesses naturelles, en particulier les pertes en sols, et les conséquences de ces pertes sur le bien-être actuel et futur des milieux et des sociétés. Qui, en effet, va payer les conséquences des appauvrissements en matières organiques et minérales, les

conséquences de l'érosion des sols, des changements hydrologiques, celles des changements climatiques locaux et régionaux ? Ceux qui y vivent et y vivront, les habitants de l'Amazonie et leurs descendants, mais certainement pas les bénéficiaires des défrichements de la forêt.

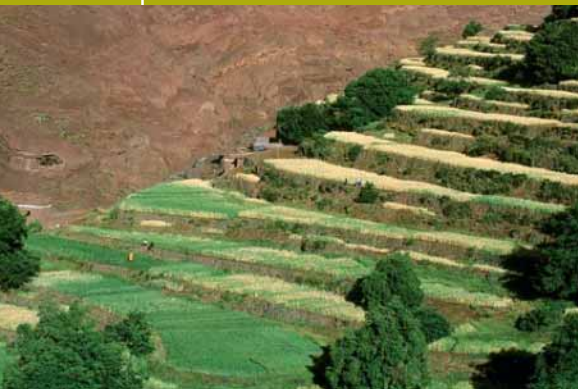
Troisième exemple : un peu partout dans le monde, les agriculteurs ont depuis longtemps recours à l'irrigation sans laquelle la production agricole serait faible et aléatoire. Cependant, l'irrigation constitue pour les sols une violente modification des conditions de vie, des sols et dans les sols. Il en résulte plusieurs phénomènes majeurs qui portent atteinte à la fertilité des sols : citons, en particulier, la compaction, conséquence des alternances répétées d'excès d'eau suivis d'une forte dessiccation ; et surtout la salinisation, qui peut conduire à la stérilisation des sols. Au XX^e siècle, des investissements très importants, publics et privés, ont été réalisés pour développer l'irrigation ; cependant, très souvent les aménageurs n'ont pas su tenir compte des pédodiversités : résultat, suite aux destructions structurales et aux accumulations de sels, des millions d'hectares sont en cours d'abandon.

Tout appauvrissement – morphologique, physique, chimique, biologique – des sols a un coût, qui le plus souvent n'est pas assumé par les « propriétaires » mais par la société dans son ensemble. On sait par ailleurs que les modifications locales

ayant des influences latérales importantes, cela pose la question des responsabilités et de la propriété : le droit de propriété peut-il continuer à être total, ne doit-on pas réfléchir à la nécessité de distinguer la propriété des sols, qui devrait être publique, non privatisable, de la propriété foncière ?

Mieux utiliser les sols





IRD/O. Barrière

Champs d'orge, culture en terrasse –
Maroc, Haut Atlas

Mieux utiliser les sols

En ce début de XXI^e siècle, les sociétés humaines sont partout confrontées à des dysfonctionnements de leurs relations avec les milieux terrestres. Tous les écosystèmes, sans exception, sont maintenant modifiés par les activités humaines dans leur organisation et dans leur fonctionnement ; et nombreux sont les écosystèmes, continentaux et marins, dont l'exploitation excessive et inadaptée conduit à la dégradation irréversible. Or les hommes ont besoin de ces écosystèmes, dont les sols font partie, pour continuer à vivre : alors comment allons-nous nous en sortir ?

Les difficiles relations entre les sols et les hommes

Parmi les problèmes à affronter, nombreux sont ceux dont la résolution implique des changements dans les relations sols-hommes. Nous en retenons cinq, tout particulièrement urgents :

- nourrir correctement et durablement les 9 milliards d'hommes qui vivront sur la planète en 2050 ;
- mettre à la disposition de tous l'accès au minimum indispensable d'eau douce non polluée ;

- assurer à chacun l'énergie renouvelable dont il a besoin ;
- freiner les changements climatiques en cours, sources de transformations difficilement prévisibles des écosystèmes et des sols ;
- gérer les déchets produits par les activités humaines.

Nourrir 9 milliards d'hommes

En 2050, il faudra nourrir un peu plus de 9 milliards de personnes : l'accroissement mais aussi l'urbanisation de cette population auront entraîné une forte augmentation des besoins alimentaires. Rappelons qu'en ce début de XXI^e siècle, nous ne sommes que 6 milliards, dont près d'un milliard connaissent la faim et deux autres milliards sont mal nourris et souffrent de carences (la grande majorité des affamés et des mal-nourris sont des paysans : absurde !).

La résolution de ce problème majeur, qui aujourd'hui préoccupe de plus en plus les acteurs et responsables scientifiques et politiques, passe d'abord par des choix politiques et socio-économiques, que nous n'aborderons pas ici si ce n'est pour rappeler que ces choix doivent favoriser les productions locales et permettre aux populations d'accéder aux aliments, c'est-à-dire de les produire ou de les

acheter. Aujourd'hui en effet, la faim dans le monde n'est pas encore en premier lieu la conséquence d'une production agricole mondiale et locale

insuffisante : elle est la conséquence pour certaines populations de l'inaccessibilité économique ; la faim des pauvres existe partout.



■ Viêt-nam

Nourrir le monde... le long des routes.

Il est évident cependant que la résolution de ce problème est également grandement liée aux conditions des milieux, parmi lesquels les sols, leurs caractéristiques et l'utilisation qui en est faite : surfaces disponibles, amélioration de la productivité (sans affecter les autres fonctions des sols), contrôle des dégradations et des écosystèmes auxquels ils appartiennent. La question principale se pose en ces termes : comment produire plus et mieux ? Peut-on augmenter les surfaces cultivées et accroître leur fertilité ? Est-il possible d'améliorer, de valoriser certaines propriétés des sols (agrégation, porosité, teneurs en matière organique), sans porter atteinte aux autres fonctions ? Peut-on lutter avec efficacité contre les dégradations, en particulier les plus graves et les plus répandues (appauvrissements organiques et biologiques, compaction, érosion, salinisation) ?

Assurer à tous un accès à une eau douce non polluée

On estime aujourd'hui à 2,8 milliards le nombre de personnes qui n'ont pas encore accès à une eau potable en quantité suffisante pour boire, cuisiner et se laver : d'où de graves problèmes de santé. Par ailleurs, on dépasse déjà actuellement de 25 % la capacité qu'a l'eau douce de se renouveler : cela est dû en particulier au fort développement de l'irrigation, pour laquelle on puise de plus en plus dans les nappes phréatiques profondes, peu voire non renouvelables.

L'un des problèmes majeurs est le raccourcissement du trajet et de la durée des cycles de l'eau : les baisses de porosité des sols, consécutives à leur mise en valeur, contribuent à augmenter les quantités d'eau qui ruissellent à la surface ou circulent à faible profondeur dans les sols. Les eaux de pluie rejoignent ainsi directement les rivières, sans passer ni par les horizons profonds des sols, ni par les nappes phréatiques. Ce cycle raccourci rend l'eau moins disponible en quantité et diminue le pouvoir filtrant et épurateur des sols.

Une bonne gestion des sols, de leur porosité et de leurs dynamiques biologiques contribue à la résolution des aspects quantitatifs (alimentation des nappes phréatiques, superficielles et profondes, des sources, des ruisseaux...) et qualitatifs (filtrage) des ressources en eau. La concurrence est grande entre les besoins individuels, d'une part, les besoins collectifs, d'autre part (agriculture irriguée, industrie, urbanisation : actuellement, à l'échelle mondiale, on estime que 75 % de l'eau douce disponible est accaparée par le monde agricole).

L'accès à une eau douce saine est un droit humain au même titre que l'accès à la nourriture : une bonne gestion des sols doit permettre à ces droits de devenir réalité pour tous.



2
3 Brésil – Amazonie

Le long du fleuve Amazone et de ses affluents, habitat dispersé, villages et villes se développent les pieds dans l'eau, leurs déchets allant souvent directement de l'habitat à la rivière. Malgré les forts débits de ce réseau hydrographique, la pollution des eaux augmente.



4 Burkina Faso

Irrigation de la canne à sucre par aspersion circulaire. Les forts besoins induits par ce mode d'irrigation peuvent assez rapidement épuiser les disponibilités en eau, en particulier si celles-ci ne se renouvellent pas assez vite.



5 Brésil – São Paulo

Eutrophisation de la rivière Tietê, à trente kilomètres à l'aval de la ville de São Paulo (photo prise en 1979, avant la mise en place à São Paulo d'une politique de gestion et de traitement des déchets et des eaux usées).

L'eau de ce fleuve est fortement enrichie en nutriments (phosphore, azote) en provenance des égouts de São Paulo. Cette richesse entraîne le développement de plantes aquatiques et d'une faune et flore microscopiques très consommatrices en oxygène : le milieu aquatique devient asphyxiant, la vie s'y épuise.

On connaît des histoires équivalentes dans les rivières qui traversent des régions d'agriculture intensive, consommatrices de beaucoup d'engrais et d'effluents d'élevage : en Bretagne par exemple, avec le développement le long des côtes de grandes quantités d'algues vertes toxiques.

Fournir à chacun l'énergie dont il a besoin

Il s'agit de produire plus d'énergie, mais aussi d'en économiser davantage. On peut produire sur les sols de grandes quantités d'agrocarburants. On peut, par ailleurs, selon les sols, réduire plus ou moins les consommations énergétiques nécessaires pour les cultiver. La question principale, cependant, est la suivante : est-il raisonnable de mettre en concurrence, sur les mêmes sols, la production alimentaire et la production énergétique ? Est-il raisonnable, en milieu tropical humide, de remplacer la forêt dense, dont la biodiversité exploitable est très élevée, par des monocultures d'agrocarburants (soja, canne à sucre ou palmier à huile), et cela sur des sols dont le peu de fertilité naturelle s'épuise très rapidement après le défrichement ?

© IRD/G. Michon



© IRD/H. de Foresta



Indonésie 6 7

En milieu tropical humide (Amazonie, Congo, Indonésie), les grandes forêts déjà menacées et en cours de destruction pour satisfaire les besoins alimentaires des hommes le sont aussi – et le seront de plus en plus – pour produire de l'énergie, des agrocarburants.

On remplace les richesses diversifiées des écosystèmes forestiers et de savane par des monocultures de canne à sucre ou de palmier à huile.

Est-ce raisonnable écologiquement ?

Certes non...

Et économiquement ?

Très probablement non plus.

Freiner les changements climatiques en cours

Ces changements sont en partie la conséquence des gaz à effet de serre produits par les activités humaines (cf. chap. 3). Les sols, par le canal des fonctionnements biologiques et par leurs capacités à stocker du carbone (et de l'azote), jouent un rôle très important dans les cycles des gaz à effet de serre. La gestion anthropique des sols peut, selon les cas, freiner ou accélérer la production de ces gaz, donc contribuer à freiner ou à accélérer les changements climatiques. En outre, les changements climatiques ont et auront des conséquences sur l'évolution des sols : sommes-nous capables de prévoir ce qui va se passer et de nous y préparer ?

En étudiant les sols de façon détaillée, on peut, en effet, avoir quelques surprises.

Ainsi l'essartage (agriculture itinérante sur brûlis) consiste à défricher, en s'aidant du feu, une partie de forêt ou de savane pour cultiver une parcelle pendant quelques années ; puis on laisse la parcelle en jachère le temps pour la végétation primaire de se renouveler à peu près. Cette pratique, souvent critiquée en raison de l'utilisation du feu qui, en particulier, libère du carbone dans l'atmosphère, est largement employée dans les régions tropicales, là où la pression démographique permet de respecter un temps de jachère suffisamment long. Au Laos et au Viêt-Nam, l'essartage se



8 Laos

Mise à feu des essarts pour la culture sur brûlis, en région montagneuse. Du fait de la structure de la couverture pédologique, les matières organiques résiduelles du feu et entraînées par l'érosion s'accumulent dans les sols là où les pentes sont les plus fortes. Dans ce cas, l'agriculture sur brûlis contribue à piéger du carbone dans les sols.

développe dans les régions montagneuses : le risque est alors à la fois, d'une part, l'évasion de carbone organique lors du feu, d'autre part, l'érosion des horizons organiques de surface qui ont perdu leur couvert végétal protecteur. Cependant, des mesures précises démontrent qu'il peut en être autrement

(travaux de l'IRD et de la recherche agronomique laotienne) : du fait des structures des couvertures pédologiques, sur certaines pentes très fortes les matières organiques sont piégées par la porosité des sols. Dans ce cas, l'agriculture sur brûlis contribue à piéger du carbone dans les sols.

Gérer les déchets

Il est important en particulier de mieux gérer les déchets issus de la production agricole et des activités urbaines et industrielles. L'épandage des déchets sur

les sols, avec pour objectif leur épuration par les dynamiques pédologiques, n'a de sens que si les quantités épandues ne dépassent pas les capacités d'accueil des sols : ces capacités varient selon les sols et selon les déchets.



9 Brésil – État de São Paulo, ville de Bauru

Une *vossoroca* (ravine d'érosion) a été choisie pour y jeter une partie des déchets en provenance de quartiers périphériques d'une grande ville. L'épandage des déchets dans la ravine devrait ralentir son extension. Mais problème : placée comme elle l'est, il y a risque de pollution des sols et des eaux situés à l'aval.

L'alliance des hommes avec les sols

Se nourrir, s'abreuver, se fournir en énergie, gérer les changements climatiques, traiter les déchets : à très court terme et parmi d'autres, ce sont cinq défis majeurs à affronter pour les sociétés humaines. Les hommes ne pourront atteindre ces cinq objectifs que s'ils savent, outre la mise en place d'approches politiques, économiques, sociales, techniques, s'allier aux sols pour mieux les utiliser, c'est-à-dire pour mieux en valoriser durablement les diverses fonctions et potentialités. Et n'oublions pas que la faim, l'eau polluée, les modifications climatiques, les déchets mal gérés... tout cela est à l'origine de nombreux problèmes de santé qu'une bonne gestion des sols doit pouvoir atténuer.

Il est urgent de s'allier aux sols, c'est-à-dire de faire du sol le compagnon de route dont l'homme a besoin, individuellement et collectivement, pour vivre sans détruire.

Il s'agit en priorité de se donner les moyens de bien utiliser les sols tout en les respectant, c'est-à-dire sans les dégrader : pour cela, il est indispensable de bien les connaître et de savoir les évaluer. En prend-on le chemin ?

1 Agrimonde : Agricultures et alimentations du monde en 2050 : scénarios et défis pour un développement durable – Inra, Cirad, février 2009.

2 IAASTD : International Assessment of Agricultural Knowledge, Science & Technology for Development.

La lecture des nombreuses publications récentes sur ces sujets laisse perplexe (prospective Agrimonde¹, expertise IAASTD²). Oui, on y évoque les sols, mais d'une manière très simplifiée : comme si l'on pouvait considérer que les sols étaient à peu près les mêmes où que l'on soit et pouvaient donc être traités partout de la même façon ; comme si les relations hommes-sols étaient identiques en tous lieux sur la Terre. Les experts qui réfléchissent aux choix pour le futur ne prennent pas vraiment en compte la diversité des sols sur la planète, ils ne reconnaissent pas la nécessité de les utiliser en tenant compte, dans le détail, des pédo- et des socio-diversités.

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté l'essentiel de ce qu'il faut connaître au sujet des sols : en particulier, l'originalité et la diversité de leur morphologie, dans l'espace et dans le temps, ainsi que le rôle clé de la vie dans la construction et le fonctionnement des systèmes pédologiques. Le sol est ainsi apparu comme un milieu certes complexe, mais aussi très logique : rien n'est aléatoire dans l'organisation et le fonctionnement des couvertures pédologiques, et pour savoir les utiliser, il faut donc se donner le temps et les moyens de découvrir à la fois ces complexités et ces logiques, c'est-à-dire les lois qui régissent les sols en relation avec les milieux naturels et avec les sociétés humaines.

Retenons ceci : pour affronter les cinq défis cités ci-dessus, il est essentiel de se donner les moyens de mieux utiliser les sols et, pour cela, il est indispensable de sortir de la simplification des réalités. Il faut au contraire prendre le temps de la découverte et de la compréhension détaillée de la diversité des constituants, des morphologies, des fonctionnements physico-chimiques et biologiques à l'œuvre dans les sols, ainsi que des relations entre ces derniers et les autres milieux (roches, hydrosphère, atmosphère, biosphère, anthroposphère).

Que faire ?

Comment aider les sols et les hommes à collaborer pour produire plus et mieux, pour mieux gérer les eaux et les ressources énergétiques, pour freiner les changements climatiques, pour gérer les déchets ?

Faut-il privilégier le « mieux occuper », le « mieux gérer » les surfaces de sol déjà utilisées ?

Faut-il augmenter les surfaces cultivées, au détriment des écosystèmes aujourd'hui moins anthropisés (forêts, savanes, prairies...) ?

Faut-il augmenter les surfaces irriguées, très gaspilleuses en eau... et en sol ?

Comment lutter contre les dégradations et les pollutions qui portent atteinte aux fonctions alimentaires, énergétiques, biologiques, hydriques, atmosphériques des sols et des écosystèmes ?

À toutes ces questions, il n'y a pas de réponse unique mais, pour réussir, des choix méthodologiques et stratégiques sont à faire.

Citons-en quelques-uns.

Bien connaître les sols

À petite échelle, les ressources en sols, leurs rôles et leurs potentialités sont assez bien connus, ce qui permet de planifier leur utilisation à l'échelle des continents... mais ce qui permet aussi à la spéculation foncière, locale et internationale, de s'en donner à cœur joie ! Voir, par exemple, les récentes opérations d'achat et de location d'immenses surfaces cultivables en Afrique par des pays plus riches mais manquant de terres. On sait à peu près où sont localisés, du point de vue agricole, les sols les plus riches et les sols les plus pauvres (encadrés 1 et 2).

En revanche, à grande échelle, détaillée, les distributions locales, verticales et latérales des caractéristiques des sols sont encore peu connues, donc peu prises en compte par les agriculteurs et par les aménageurs. Par exemple, pour mieux utiliser les sols, pour mieux gérer les relations sols-eaux et sols-atmosphère, il faudrait pouvoir aménager les parcelles agricoles et urbains en fonction de la réalité des variations pédologiques verticales et latérales, en particulier en fonction des variations des porosités (dont dépendent les fonctions alimentaires et les fonctions d'échanges

des sols) : on en est loin... Il faudrait pouvoir établir et réaliser les plans d'occupation des sols en fonction des réalités pédologiques : il n'en est rien, les critères d'ordre foncier ayant actuellement beaucoup plus de poids que les critères pédologiques.

Mieux connaître les divers types de couvertures pédologiques, leur nature, leur localisation, leur mode et leur vitesse de transformation sous l'action des facteurs naturels et des activités humaines constitue une urgence. En particulier, la cartographie détaillée des sols – des systèmes pédologiques – devrait être réalisée partout : ce sont en effet ces études fines des morphologies pédologiques qui permettent, d'une part, de suivre dans le temps et de prévoir l'évolution des propriétés des sols et, d'autre part, d'utiliser intelligemment et de généraliser les résultats des travaux scientifiques détaillés menés par ailleurs dans les domaines de la physique, de la chimie et de la biologie des sols.

Améliorer les fonctionnements des sols déjà utilisés

Du point de vue agricole, il s'agit d'essayer de produire mieux, sans dégrader les sols. Mais il s'agit aussi, en valorisant certaines de leurs propriétés, de mieux gérer leurs fonctions essentielles.

Nous détaillons ci-après trois exemples parmi ces priorités.



© IRD/S. Dupont

10 Nouvelle-Calédonie – Sud

Sur roche basique (coulée volcanique), les structures en agrégats arrondis et poreux se développent facilement (en raison d'un complexe adsorbant élevé, saturé en calcium, d'un taux élevé en matières organiques et d'une forte activité biologique).

Les structures arrondies assurent aux racines un bon « confort morphologique » ; elles facilitent le développement des systèmes racinaires, qui contribuent alors eux-mêmes au renouvellement permanent de ces structures.

Favoriser le « confort morphologique » nécessaire à la vie dans les sols

Parmi ces propriétés trop souvent négligées figure ce que l'on peut appeler le « confort morphologique » que les sols peuvent offrir aux systèmes racinaires des cultures et à l'ensemble des activités biologiques (encadrés 1 et 2). Il importe de favoriser l'utilisation plus fine, plus intime et plus profonde des sols par les racines des plantes et par l'ensemble des activités biologiques qui contribuent au fonctionnement de la vie : augmenter l'épaisseur de sol utilisable et utilisé – donc lutter contre les tassements et les limites brutales entre horizons –, faciliter la pénétration des agrégats par les racines et par l'ensemble des acteurs vivants du sol – cela passe par davantage de matières organiques qui favorisent les agrégations arrondies et poreuses. Les systèmes racinaires devraient pouvoir être denses jusqu'à au moins 100 cm de profondeur : les capacités d'accueil des activités biologiques par les sols en seraient ainsi fortement augmentées.

Pour parvenir à une exploitation plus complète des sols (enracinements complémentaires et plus profonds), des pratiques telles que les cultures associées, les assolements, l'agroforesterie sont des voies à privilégier : les nombreuses expériences déjà réalisées un peu partout dans le monde, scientifiques mais aussi

Encadré 1

**Porosités, matières organiques, nutriments :
trois piliers de l'alliance entre les sols et les hommes**

Parmi les connaissances à affiner pour répondre aux cinq défis de l'alimentation, de l'eau, de l'énergie, de l'air, des déchets, une attention particulière doit être portée à trois caractéristiques importantes des sols : les porosités, les matières organiques, les nutriments qui y sont accessibles.

Les porosités

Les porosités des sols et l'entretien de leur diversité, en surface et en profondeur, sont essentiels. Les divers types de vides sont, en effet, indispensables :

- pour faciliter l'enracinement intime et profond des plantes, condition nécessaire pour leur bonne alimentation. Cet enracinement est lui-même générateur de porosités et les structures en agrégats arrondis et poreux permettent une forte pénétration des racines en leur sein, donc une meilleure alimentation des plantes ;
- pour améliorer la pénétration intime de l'eau sur toute l'épaisseur du sol, jusqu'à la roche :
 - l'eau doit en effet pouvoir atteindre, pour échanger et pour se filtrer, le maximum de surfaces d'échange (c'est-à-dire de parois des vides) ;
 - la porosité verticale doit aussi faciliter l'arrivée de l'eau, d'une part jusqu'au front d'altération de la roche, là où le matériau sol commence à se fabriquer (l'eau est indispensable à l'altération), d'autre part jusqu'au niveau des nappes phréatiques, donc des sources puis des ruisseaux ;
- pour éviter les ruissellements superficiels, générateurs de l'érosion et des pollutions ;
- pour faciliter l'entretien de la vie : la diversité morphologique et géochimique des vides facilite le développement des diversités biologiques sur toute l'épaisseur de la couverture pédologique ; à chaque type et taille de vides correspondent des activités biologiques spécifiques.

L'homme qui utilise le sol doit donc être très attentif à l'entretien des divers types de porosités et à leur bon usage.

Les matières organiques

La deuxième propriété à laquelle il faut être attentif concerne les matières organiques.

Cela pour trois raisons essentielles :

- les matières organiques des sols contribuent à l'agrégation stable, donc à la construction de porosités stables et durables ;
- les matières organiques stockent des éléments nutritifs et les libèrent en fonction des besoins des plantes et de la vie en général ;
- les matières organiques stockent le carbone, donc contribuent à abaisser les teneurs en carbone dans l'atmosphère.

Les nutriments

Pour que les sols puissent nourrir les plantes, il faut qu'ils soient eux-mêmes nourris. Ils le sont naturellement par l'altération des roches, par les pluies et par les poussières atmosphériques, par les matières organiques, par l'ensemble des activités biologiques... Cela étant, selon les climats, les roches et les couvertures pédologiques, la capacité des sols à nourrir les plantes cultivées varie beaucoup. D'où la question des engrais, souvent indispensables, mais qu'il faut apprendre à apporter de manière nuancée, au cas par cas. Par ailleurs, pour les plantes (comme pour les pédologues...), le sol ne s'arrête pas à 20, 30 ou 40 cm de profondeur. Les racines et toute l'activité biologique peuvent, doivent pouvoir aller beaucoup plus en profondeur, donc pouvoir se nourrir à partir d'un volume de terre beaucoup plus important que celui délimité par le travail du sol. Encore faut-il leur faciliter la tâche.

paysannes, mériteraient d'être étudiées de plus près, d'être évaluées du point de vue des relations sols – plantes – eaux – atmosphère et d'être diffusées. Des travaux de sélection génétique portant sur les systèmes racinaires sont aussi à développer.

Mieux gérer l'irrigation

Dans la même perspective, il est important de chercher à améliorer la productivité des sols irrigués puis, éventuellement, là où l'eau est présente en quantité suffisante, de chercher à augmenter les surfaces irriguées. On relève au niveau mondial beaucoup trop de pratiques néfastes à une bonne utilisation de l'eau d'irrigation : en conséquence, les phénomènes de salinisation, déstructuration, compactage des sols sont trop fréquents ; il en est de même de la salinisation et de la pollution des nappes, du gaspillage de l'eau... ; 77 millions d'hectares de sols irrigués – soit 28 % des surfaces irriguées – ont été dégradés, en particulier par l'accumulation des sels. Or ces dégradations, leurs causes et leurs conséquences sont connues : il faut donc se donner les moyens de faire appliquer les connaissances déjà acquises.



11 Guinée

Rizière de mangrove. Elle est le résultat d'une expérimentation visant à introduire des petits aménagements hydro-agricoles peu onéreux pour permettre une gestion adéquate des eaux de pluie et de mer et augmenter naturellement la fertilité des sols. À droite du drain, on peut voir une rizière aménagée présentant une récolte à maturité et des rendements de 3 t/ha. À gauche du drain, une rizière non aménagée présentant un retard important de maturité et ne donnant des rendements que de 500 kg/ha.

limiter les dégradations

Connaître et freiner les dégradations des sols, de leurs fonctions et de leur fertilité est une priorité. Mais il faut aussi évaluer les conséquences des divers types de dégradations sur la fertilité, la producti-

tivité des sols, sur les fonctions majeures de ces derniers vis-à-vis de l'eau, de l'air et des cycles biologiques. Il importe enfin de développer les recherches portant sur les vitesses de régénération des caractères dégradés.

Encadré 2

La fertilité des sols

■ Par rapport à la production agricole, la fertilité d'un sol, c'est-à-dire sa capacité à produire de la biomasse, est fonction :

- de sa texture, en particulier des teneurs en argile capable de retenir l'eau et les nutriments utilisables par les racines ;
- des matières organiques et de l'activité biologique qui le structurent et rendent les nutriments biodisponibles ;
- des matières organiques qui le recouvrent : elles contribuent au développement de l'activité biologique, à la conservation de l'eau, à la limitation de l'érosion ;
- des nutriments accessibles, biodisponibles et mobilisables (éléments majeurs et oligo-éléments) ;
- de sa morphologie (agrégats, porosités, horizons), qui assure ou complique l'accessibilité des racines à l'eau et aux nutriments ;
- de l'épaisseur accessible : cette épaisseur peut être limitée par l'apparition de la roche peu altérée, ou d'un horizon pédologique « hostile » (accumulation de calcaire, hydromorphie...), ou par la présence d'une limite structurale (variation brusque de la porosité...).

■ L'ensemble de ces caractères de fertilité d'un sol, d'une « couverture pédologique », se modifie verticalement mais aussi latéralement, selon des lois qu'il faut connaître si on veut valoriser et améliorer ces caractères. Les sols sont le produit de l'altération des roches par l'eau, l'air et la vie ; ils sont donc différents les uns des autres en fonction des climats, des roches, des végétations, des positions topographiques, mais aussi en fonction de leur âge : ces variations latérales existent à toutes les échelles, depuis celle des continents et des régions jusqu'à celle de la parcelle de l'agriculteur et celle de la plante et de ses racines (cf. chap. 1 et 2).

■ Sous végétation naturelle (forêts, steppes, prairies), la fertilité morphologique et chimique des sols est entretenue par l'altération des roches, par les pluies, par les cycles biologiques : les sols les plus riches sont ceux développés sur roches basiques et sous climat moyennement pluvieux (loess sous climat continental ; roches calcaires sous climat méditerranéen semi-aride et sub-humide ; roches calcaires et basaltes des régions tropicales à saison sèche accentuée...). La fertilité chimique des sols est partiellement entretenue par l'activité des racines et par les activités biologiques animales (termites, fourmis, vers de terre...) qui altèrent les roches et font remonter les minéraux issus des altérations.

■ L'érosion naturelle empêche les sols de s'épaissir excessivement, c'est-à-dire de se couper de la roche-mère qui les alimente. Sauf dans les régions tropicales humides et équatoriales, où les horizons supérieurs sont coupés, « déracinés » de leur roche-mère qui ne les alimente plus. Par ailleurs, l'érosion est à l'origine de la mise en place, à l'aval, d'alluvions fertiles.

■ Dans la matière organique des sols, on trouve de l'organique et du minéral.

- L'organique contribue à structurer, à charpenter le sol, le rendant plus ou moins accessible au minéral qu'il contient.

- La composition minérale de la matière organique, produite dans et sur un sol, dépend des caractéristiques morphologiques et minérales des horizons pédologiques où s'enracinent les plantes et où s'active la biodiversité animale. De ce fait, la fertilité minérale des matières organiques dépend, à la fois :

- de la profondeur à laquelle se trouve la roche en voie d'altération,
- de la richesse de cette roche,
- de la profondeur à laquelle se trouvent certains horizons pédologiques enrichis,
- donc de l'épaisseur des sols,
- de la capacité des plantes à s'enraciner profondément.

Au total :

■ Les **répartitions géographiques de la fertilité** des sols sont fonction des variations spatiales des climats, des roches et des reliefs, mais aussi de l'âge des sols et des systèmes pédologiques, de l'histoire des pratiques agricoles et des aménagements anthropiques.

Au niveau mondial, les sols présentant les **meilleures fertilités** agricoles sont situés :

- en milieu méditerranéen, en milieu tempéré, en milieu continental : les argiles qui s'y forment sont « bisiallitiques », à forte capacité d'échange ; par ailleurs les lessivages minéraux y sont faibles ;
- dans les plaines ;
- sur roches calcaïques et calcaires.

Les sols présentant les **fertilités les plus faibles** sont situés :

- en milieu équatorial et tropical humide : les argiles qui s'y forment sont « monosiallitiques », à capacité d'échange faible ; les lessivages minéraux y sont forts ;

- en milieu tempéré océanique et continental froid en hiver, sur roches acides et perméables ; les lessivages minéraux y sont forts ;

- en milieu à relief accentué.

■ La notion de **sol cultivable** doit être précisée : en fait, tout ce qui est sol est cultivable, mais cela est plus ou moins facile, donc plus ou moins coûteux, et plus ou moins recommandable. Ainsi :

- on trouve beaucoup de bons sols dans les déserts : oui, mais il faut de l'eau ; on peut dessaler l'eau de mer et la transporter là où on en a besoin : oui, mais quelles seront les conséquences locales et mondiales (climatiques, biologiques...) de ces transformations hydrologiques ?

- il y a beaucoup de bons sols dans les régions à relief accentué ; oui, mais pour les mettre en valeur, il faut les aménager (terrasses pour épaissir les sols, pour pouvoir les irriguer, pour empêcher leur érosion) ;

- il y a beaucoup de bons sols sous les forêts : oui, mais on a besoin des forêts pour la bonne gestion de l'eau, de l'air, de la biodiversité, des futures ressources énergétiques.

■ **Les dégradations** peuvent atteindre tous les sols utilisés par les sociétés humaines : sols cultivés, sols pâturés, sols urbanisés et industrialisés... mais aussi les sols voisins.

On sait décrire ces dégradations (appauvrissements organiques, biologiques, minéraux ; destructurations et tassements ; érosion ; salinisation ; pollutions ; recouvrement par l'urbanisation...) mais on ne sait pas bien évaluer et chiffrer leur gravité et leurs conséquences sur la fertilité et sur la productivité des sols.

Augmenter les surfaces cultivées

Au niveau mondial, tous les sols facilement cultivables ne sont pas encore utilisés. Les chiffres avancés sont cependant hétérogènes : certains parlent de la possibilité de doubler ces surfaces sans pour autant diminuer les surfaces actuellement consacrées aux forêts (1,5 milliard d'hectares sont actuellement cultivés ; les estimations des nouvelles surfaces que l'on pourrait encore facilement mettre en valeur oscillent, selon les auteurs, de 1,3 à 3,5 milliards d'hectares) (encadré 3).

Au-delà des surfaces facilement cultivables, il faut aussi s'interroger sur les potentialités existant dans des milieux plus difficiles.

Dans les régions montagneuses, peut-on par exemple augmenter de manière significative les surfaces déjà aménagées en terrasses sur pentes fortes ? Doit-on inciter à ne pas cultiver sur pente forte non aménagée ? Le regard comparatif sur divers milieux (montagnes méditerranéennes, Asie du Sud-Est, pays andins) conduit à répondre positivement : l'extension de l'aménagement des sols sur pente forte est possible, voire impératif, à condition cependant que les matériaux pédologiques soient fertiles et que les productions agricoles prévues soient payées à leur juste prix.

Autre exemple, peut-on envisager de remettre en valeur des sols « marginalisés » par l'évolution des conditions socio-économiques ? Bien des sols, aujourd'hui



12 Laos – Au sud de Luang Prabang

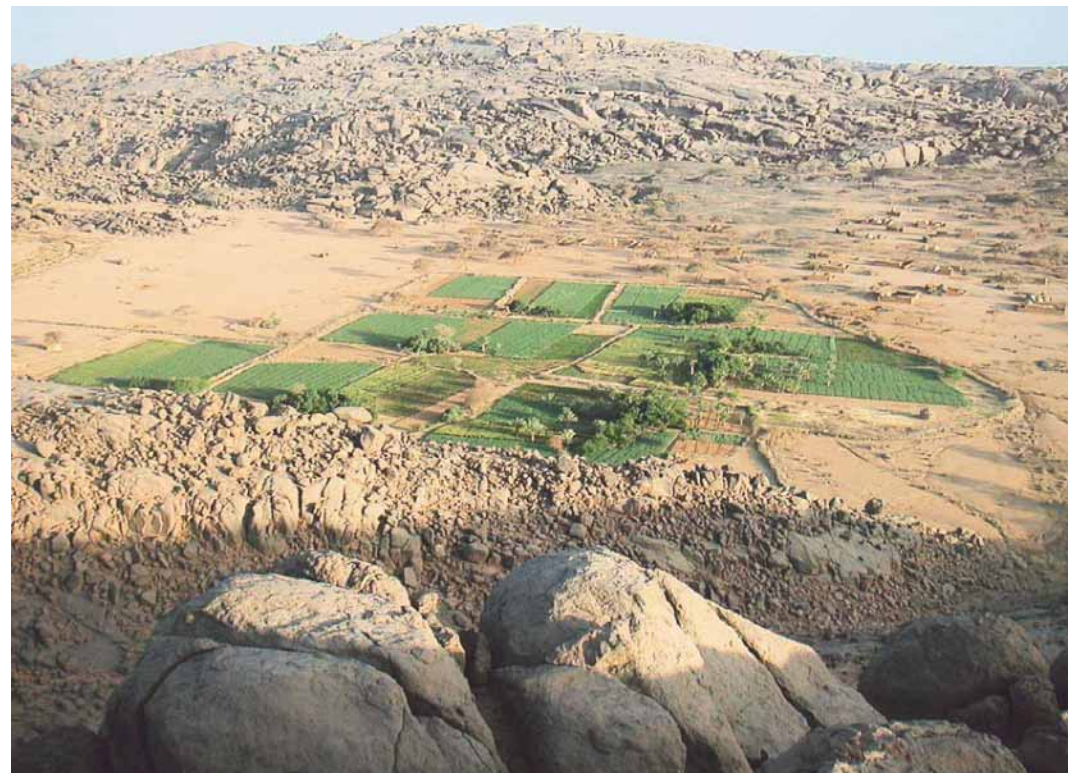
Malgré les fortes pentes, le parcellaire ne s'inscrit pas dans une démarche de lutte contre l'érosion. Riz pluvial en vert clair ; jachères de quelques mois à quelques années (graminées et forêts).



13 Équateur

Champs en bandes étroites sur pente très forte.

Dans toutes les régions du monde, les agriculteurs font preuve d'imagination et d'efforts pour valoriser au mieux les sols dont ils peuvent disposer. Ils s'adaptent aux sols et aux pentes, sans avoir forcément les moyens ni le temps de les aménager, et prennent alors le risque de l'érosion.



14 Niger – Village et jardins d'Akodédé

Entre les chaos rocheux dans les plateaux argileux à 1 500 m d'altitude, le développement de jardins irrigués permet la culture de blé, d'agrumes, de figes, mais aussi de pommes de terre et de pêches. L'avenir de ces jardins dépend de la renouvelabilité de l'eau des nappes phréatiques dans lesquelles on prélève pour irriguer, ainsi que de la chimie de ces eaux (risque de salinisation).

Les agriculteurs aménagent et transforment les sols. Là où les reliefs sont accentués, les sols fertiles mais peu épais et l'irrigation indispensable, les agriculteurs se lancent dans des aménagements gigantesques, qu'il faut entretenir. Leurs objectifs sont, principalement, l'épaississement des sols, l'arrêt de toute érosion, l'irrigation.



© IRD/M.-N. Favier

15 Yémen – Djebel Haraz

Les reliefs des hautes terres, montagnes d'origine volcanique, sont sculptés par les terrasses pour faire naître des cultures de sorgho ou de café.



© IRD/V. Simonneux

16 Maroc – Haut Atlas occidental

Paysage agricole près de Zawyat Sidi Boujam'a, plateau du Yagour.



© IRD/V. Simonneux

17 Népal – Région du Kanchenjunga

Cultures en terrasses. Le riz jaune est déjà mûr, le millet en vert près des villages ne l'est pas.

Encadré 3

Les superficies

Superficie de la planète Terre	51,0 milliards d'hectares
Superficie des continents	15,0 milliards d'hectares
Superficie des sols en culture	1,5 milliard d'hectares
Superficie des sols sous forêts	1,4 milliard d'hectares
Superficie de sols non cultivés, facilement cultivables	1,1 milliard d'hectares
Superficie de sols non cultivés, difficilement cultivables	1,0 milliard d'hectares
Superficies continentales sans sols ou avec des sols très difficilement cultivables (régions trop froides ou trop arides ou trop humides ou sur pentes trop fortes...)	10,0 milliards d'hectares

D'après FAO (2003)

considérés comme non cultivables, l'ont été par le passé et pourraient de fait être remis en culture. C'est le cas en milieu méditerranéen des sols rouges, argileux et décarbonatés des Causses : ce sont des sols très fertiles, mais distribués en poches au sein de roches calcaires et dolomitiques très dures (cf. chap. 1 et 2). Dans certaines régions, ces sols, reconquis par la garrigue et par le pâturage extensif, sont depuis peu remis en valeur par la viticulture et l'arboriculture. Il y a aussi dans les déserts d'immenses surfaces de sols excellents enfouis sous les « regs », caillouteux mais faciles à épierrier : mais il faut de l'eau... (cf. chap. 2).

Enfin, pour augmenter les surfaces mises à la disposition de l'agriculture, il est indispensable de lutter contre le développement excessif et anarchique des surfaces urbanisées, industrialisées, ainsi que de celles consacrées aux voies de

communications : en France de 1992 à 2003, 61 000 hectares de terres agricoles ont été bétonnés chaque année ; et, depuis 2006, cette artificialisation progresse : on en est à 86 000 hectares par an, soit l'équivalent, tous les sept ans, de la surface d'un département français. Aujourd'hui, 9 % de la France est ainsi artificialisée, bétonnée (données publiées en juillet 2010 par « Agresta Primeur », revue du ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche). Or, ce sont souvent les meilleurs sols agricoles ainsi que les sols dont on a le plus besoin pour gérer les eaux, les déchets et l'atmosphère qui subissent ce triste sort. Cette situation pose le problème de qui décide, et de comment on décide de l'utilisation des sols. Le sol est un « bien public mondial » dont la privatisation, telle qu'elle existe actuellement, apparaît de plus en plus comme un contresens.

Tout cela ne se fera que si les conditions économiques et sociales sont modifiées, en prenant en compte des points particulièrement importants :

- la mise en concurrence de producteurs agricoles dont les « capitaux sols » sont très différents n'a pas de sens ;
- un hectare de podzol ne produira jamais autant qu'un hectare de chernozem : or, on aura besoin de mettre en valeur ces deux hectares et, pour cela, il sera nécessaire de mieux payer le kilo produit sur podzol que le kilo produit sur chernozem ;

– les sociétés humaines doivent assurer à leurs agriculteurs les conditions socio-économiques qui leur permettent de vivre correctement.

Le sol est un « bien public mondial » dont la privatisation, telle qu'elle existe actuellement, apparaît de plus en plus comme un contresens.



© M. Dosso

18 France – Au nord de Paris

De riches plaines agricoles sont conquises par le développement de l'aéroport Roissy-Charles de Gaulle.

Ce n'est pas le sol qui peut s'adapter aux hommes : ce sont les hommes qui doivent chercher à s'adapter à la diversité des sols.

Quelques autres soucis majeurs

Nous les avons déjà évoqués, nous les rappelons brièvement : l'avenir diversifié des sociétés humaines en dépend.

- Entretenir et développer les **cycles biologiques nutritionnels**, en relation avec les « sources » en éléments minéraux : roches-mères, atmosphère, pluies... Limiter les excès de fertilisation minérale, qui se traduisent par de graves pollutions (des sols, des eaux, de l'air), mais aussi éviter d'atteindre l'épuisement des ressources nutritives des sols.
- Améliorer la **circulation et le filtrage de l'eau** qui doit, à la fois, désaltérer la vie du sol puis contribuer à l'altération des roches, c'est-à-dire à la formation du matériau sol, et enfin alimenter les nappes phréatiques.
- Augmenter le **stockage du carbone** sous la forme de matières organiques qui sont nécessaires pour la construction des porosités, pour l'alimentation des organismes vivants, pour la régulation des teneurs dans l'atmosphère des gaz à effet de serre.

- Faire très attention aux fonctions non alimentaires des sols (filtre, hydraulique, biodiversité, accumulateur de carbone...). La fonction « agricole » du sol est une « invention » de l'homme, qui lui est certes indispensable, mais dont le développement excessif se fait trop souvent au détriment des fonctions premières du sol. L'utilisation agricole des sols date de 10 000 ans environ ; or les sols et leurs fonctions ont, pour le moins, 450 millions d'années d'histoire ; il ne faut pas oublier ce fait.

- Prévoir comment les sols, leur fertilité et l'ensemble de leurs fonctions vont évoluer à la suite des **changements climatiques**. Il s'agit de prévoir l'influence des changements climatiques et de leurs causes sur l'évolution des sols, mais aussi l'influence des sols sur les changements climatiques : il est nécessaire d'élaborer dans ce domaine une politique concrète d'intervention sur les sols, dans le but de freiner les changements climatiques.

- **Quantifier**, avec un minimum de précision, **les qualités et les défauts des sols** ainsi que les dégâts causés par les divers types de dégradations (encadré 4).

Tout cela doit être fait en tenant compte de toutes les pédodiversités, c'est-à-dire en évitant les « recettes », les solutions passe-partout. Ce n'est pas le sol qui peut s'adapter aux hommes : ce sont les hommes qui doivent chercher à s'adapter aux diversités pédologiques.

Encadré 4

Quantifier

Peut-on dresser l'état des lieux, peut-on quantifier le positif et le négatif des changements dus aux activités humaines ?

La présence de l'homme sur Terre change tout. De plus en plus et de plus en plus vite, les hommes façonnent une Terre nouvelle, qu'ils veulent plus confortable mais qui se révèle comme allant vers l'abolition des diversités avant même d'avoir eu le temps de les connaître et de les comprendre.

Pour ce qui est des sols, les hommes défrichent d'abord pour cultiver : il y a immédiatement perte de diversités et de richesses vivantes, perte de matières organiques, destruction des porosités, développement de l'érosion, appauvrissement en nutriments... Au total, tous les sols cultivés sont modifiés et si on estime que ces modifications portent atteinte aux fonctions que les sols assurent, on dit que les sols sont « dégradés ».

Cependant, il est très difficile de chiffrer, avec précision, l'état des lieux, par exemple de comparer les états d'avancement des dégradations, d'en déduire les conséquences économiques et sociales. Attention, en particulier, à ces cartes mondiales à petite échelle sur lesquelles on délimite, avec une précision très faible, des sols qui seraient très dégradés et des sols qui le seraient moins, voire pas du tout.

Il faut admettre que tous les sols cultivés sont transformés, en positif ou, plus souvent, en négatif. Ces transformations ont des coûts, très difficiles à évaluer, mais il est indispensable d'essayer de le faire. Il faut évaluer les conséquences économiques de chaque type de dégradation et les coûts des reconstructions : reconstruire les dynamiques biologiques et organiques, reconstruire et restructurer les horizons compactés et/ou érodés, dessaler, dépolluer...

La fonction « agricole » du sol est une « invention » de l'Homme, qui lui est certes indispensable, mais dont le développement excessif se fait trop souvent au détriment des fonctions premières du sol.

Les paysans modifient la morphologie de la surface du sol et, selon les climats, les sols et les techniques dont ils disposent, les champs sont préparés différemment.

© IRD/E. Hien



19 Burkina Faso – Nord (Yatenga)

En climat tropical sahélien, sur sol limono-sableux pauvre, les semis du mil et du sorgho se font selon la technique du « zai » : on creuse des petits trous régulièrement espacés ; pendant la saison des pluies, ces trous recueillent le peu d'eau de pluie qui ruisselle ; puis on sème.

Cette technique peut être améliorée en ajoutant dans les trous le peu de fumier organique dont on peut disposer.

Cette technique est une réponse à la formation à la surface des sols de minces croûtes imperméables qui provoquent ruissellement, érosion, pertes d'eau et gênent la croissance des plantules.



20 Togo

En climat tropical, sur roche volcanique basique, formation d'un sol ferrallitique argileux, rouge, fertile (Nitisol).

Sol préparé pour la culture de l'igname :

la confection de buttes est nécessaire au bon développement du tubercule.

L'avenir est affaire de tous et de chacun

Le sol n'est pas seulement l'affaire des utilisateurs directs (agriculteurs, industriels, techniciens, constructeurs de routes, services publics et collectivités territoriales), mais aussi de chaque citoyen, car chacun est, d'une manière ou d'une autre, utilisateur des sols.

Le propriétaire d'une terre ne peut pas continuer à avoir tous les droits concernant l'utilisation de « ses » sols. En particulier, des lois et des plans doivent être élaborés pour protéger les meilleurs sols agricoles, ainsi que les sols qui peuvent l'être, contre les usages non alimentaires et contre les menaces de dégradation de la fertilité et des autres fonctions. L'utilisation correcte des sols exige de chaque citoyen qu'il soit clairement informé et formé à la découverte des couvertures pédologiques.

La Terre est connue... le sol doit l'être

Les recherches scientifiques menées tout au cours de la seconde moitié du XX^e siècle ont révélé l'importance des sols dans le fonctionnement des écosystèmes et dans le déroulement des cycles de l'eau et de l'atmosphère. Elles ont aussi démontré les liens étroits établis entre les sols et les hommes : les populations

se sont développées en puisant dans les sols, les liens entre les hommes et les sols se nouant très vite, mais en déséquilibrant, brusquement, les fonctionnements naturels des écosystèmes et des cycles.

Aujourd'hui, plus que jamais, les hommes ont besoin des sols.

Et les sols sont là. Bien que blessés, ils continuent à se former, à accueillir le vivant, à réguler les cycles de la matière ; ils sont disponibles pour les hommes. Encore faut-il que les hommes soient raisonnables, c'est-à-dire qu'ils admettent qu'ils doivent, humblement, prendre le temps d'apprendre à les connaître.



17 Tunisie centrale

Champ de coquelicots.

Bibliographie

Cette bibliographie présente majoritairement des ouvrages et des sites en langue française.

I - Des ouvrages pour continuer à découvrir les sols et leurs relations avec les hommes

BOULAIN J., 1989 – *Histoire des pédologues et de la science des sols.* Paris, Inra

Les enseignements de l'histoire.

BRABANT P., HABERT E., 2008 – *Activités humaines et dégradation des terres.* Paris, IRD Éditions, cédérom.

Exemples pris en Afrique et en Asie.

COQUET Y., RUELLAN A., 2010 – *Les sols du monde pourront-ils nourrir 9 milliards d'humains ?* Paris, éditions Le Pommier.

Comment répondre à cette question tout en préservant durablement toutes les fonctions essentielles assurées par les sols.

FONTAINE L., ANGER R., 2010 – *Bâtir en terre.* Paris, Belin/Cité des Sciences.

Du grain de sable à l'architecture, pourquoi et comment bâtir avec des « terres » issues de divers types de roches et de sols.

FRAPNA, 2009 – *Le Sol m'a dit...* Lyon, éditions FRAPNA, Fédération Rhône-Alpes de protection de la nature Ensemble pédagogique avec pour objectif la découverte du sol et de ses habitants.

GIRARD M.-C., WALTER C., REMY J.-C., BERTHELIN J., MOREL J.-L., 2007 – *Sols et environnement.* Paris, Dunod. Cours, exercices, études de cas.

GOBAT J.-M., ARAGNO M., MATTHEY W., 2010 – *Le sol vivant.* Lausanne, Editions Presses polytechniques et universitaires romandes. Manuel de pédologie et de biologie des sols.

GUYON É. (sous la direction de) *et al.*, 2010 – *Matière et matériaux. De quoi est fait le monde ?* Paris, Belin.

Les sols sont, à la fois, matière et matériaux. L'observation des sols contribue à la compréhension des comportements de divers types de matériaux.

LAHMAR R., RIBAUT J.-P., coord., 2001 – *Sols et sociétés, regards pluriculturels.* Paris, Éditions Charles Léopold Mayer. Diversité des sols et des sociétés. Passé, présent et futur des relations sols-sociétés.

LANDA E., FELLER C., coord., 2009 – *Soil and Culture.* Londres, Springer.

Les perceptions du sol dans les cultures, anciennes et modernes, des sociétés humaines.

MATHIEU C., 2009 – *Les principaux sols du monde. Voyage à travers l'épiderme vivant de la planète Terre.* Paris, Lavoisier.

Une présentation des sols du monde et de leur utilisation par les sociétés humaines.

NAHON D., 2008 – *L'épuisement de la Terre, l'enjeu du XXI^e siècle.* Paris, Odile Jacob.

Sous l'effet de l'intensification des activités humaines, les sols se dégradent plus vite qu'ils ne se construisent : comment réagir ?

RUELLAN A., DOSSO M., 1993 – *Regards sur le sol.* Paris, Foucher/Aupelf.

Démarche pédagogique illustrée pour découvrir et comprendre les sols. Ouvrage accompagné d'outils pédo-pédagogiques : films, CD, brochures, exposition, mallette.

RUELLAN A., POSS R., 2008 – *Les sols pour l'avenir de la Planète Terre.* Afes.

Brochure de 16 pages illustrées pour découvrir les sols.

SCHWARTZ D., 2009 – *Un sentier des sols.*

Quarante et un posters sur cinq kilomètres de chemins en Alsace.

II - Des ouvrages pour approfondir

BAIZE D., GIRARD M.-C., coord., 2008 – *Référentiel pédologique.* Versailles, éditions Quae.

Une contribution française à l'inventaire des sols de France et d'ailleurs.

CHEVERRY C., GASCUEL C., coord., 2009 – *Sous les pavés, la Terre.* Montreuil, éditions Omniscience.

Connaître et gérer les sols urbains.

CITEAU L., BISPO A., BARDY M., KING D., coord., 2008 – *Gestion durable des sols.* Versailles, éditions Quae. Mieux connaître les processus de dégradation des sols et les méthodes permettant d'y remédier durablement.

DECKERS J. A., NACHTERGAELE F. O., SPAARGAREN O. C., 1998 – *World Reference Base for Soil Resources.* Leuven, Editions Acco. WRB est le référentiel international permettant les échanges de données scientifiques et techniques sur les sols.

DUCHAUFOR P., 2001 – *Introduction à la science du sol : sol, végétation, environnement.* Paris, Dunod.

Les fondements de la science du sol.

FONTAINE C., POSS R., coord., 2009 – *Les sols, des milieux vivants très fragiles.* Suds en ligne, les dossiers thématiques de l'IRD sur Internet.

Les recherches de l'IRD et de ses partenaires concernant les sols.

JAILLARD B., Inra, POSS R., IRD, DORTHE C., coord., 2009 – *Le sol, épiderme vivant de la Terre.* Inra, IRD, Agropolis international, Dossier Agropolis International.

Les compétences en recherche sur les sols à Montpellier et dans l'ensemble du Languedoc-Roussillon.

LEGROS J.-P., 2007 – *Les grands sols du monde.* Lausanne, Editions Presses polytechniques et universitaires romandes.

La diversité des sols du monde : causes et conséquences.

LOZET J., MATHIEU C., 2002 – *Dictionnaire de science du sol.* Paris, Lavoisier.

Significations des mots et des expressions utilisés en science du sol, traductions en anglais.

ROBERT M., 1996 – *Le sol : interface dans l'environnement, ressource pour le développement.* Paris, Masson.

Sols et développement durable.

STENDEL P., GELIN S., coord., 1998 – *Sol, interface fragile.* Versailles, éditions Inra.

Le sol, lieu d'échanges et de transferts.

STENDEL P., BRUCKLER L., BALESJENT J., coord., 2009 – *Le sol.* Versailles, éditions Quae.

Les recherches concernant les sols menées à l'Inra.

III - Sites Internet

AFES, Association française pour l'étude du sol : <http://www.afes.fr>

European Soil Portal : <http://eusoils.jrc.ec.europa.eu>

IUSS, International Union of Soil Science : <http://www.iuss.org>

FAO, Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture : http://www.fao.org/nr/lass/lass_fr.htm

ISRIC, World Soil Information : <http://www.isric.org>

Glossaire

Agrégats : volumes de constituants minéraux et organiques agrégés, de taille millimétrique à centimétrique ; les formes peuvent être arrondies, anguleuses, feuilletées ; les agrégats sont, typiquement, une structure pédologique.

Altération des roches : transformation des roches et de leurs minéraux sous l'action de l'eau, de l'air et des organismes vivants ; les constituants et les structures de la roche disparaissent pour laisser place aux constituants et aux structures des sols.

Allophanes : silicates mal cristallisés, présents souvent dans les sols développés sur roches volcaniques (Andosols).

Andosols : sols formés sur roches volcaniques, en milieu humide ; ils sont très fertiles.

Argile : – minéral (silicate) à structure feuilletée ; – particule minérale de dimension inférieure à 2 micromètres.

Battance : formation à la surface du sol d'une pellicule de quelques millimètres d'épaisseur à porosité fermée ; cette formation est la conséquence de la destruction des agrégats superficiels par la frappe des gouttes de pluie ou d'irrigation par aspersion ; une fois formée, la croûte de battance gêne les activités biologiques du sol ainsi que les échanges entre le sol et l'atmosphère ; elle

provoque le ruissellement et l'érosion. En région aride, de fines croûtes d'origine microbiologique prennent aussi naissance ; elles ont souvent la particularité d'enrichir les sols en substances carbonées et azotées et de contribuer à une meilleure stabilité structurale de la surface des sols.

Bisiallitique : qualifie les sols au sein desquels les minéraux argileux qui se forment sont riches en silice ; ces minéraux argileux ont de fortes capacités d'échanges en cations (illite, vermiculite, montmorillonite).

Bruns (sols) : sols peu différenciés des régions tempérées, formés sur roches non ou peu calcaires.

Capacité d'échange : quantité de cations que le complexe adsorbant peut retenir au maximum sur les surfaces des constituants minéraux et organiques.

Cation : atome ayant perdu un ou plusieurs électrons de charge négative ; il est donc porteur d'une ou plusieurs charges positives ; dans les sols, plusieurs cations sont essentiels pour la dynamique des structures (floculation et dispersion des argiles) et pour l'alimentation des plantes (calcium, magnésium, ammonium, potassium, sodium, aluminium, fer, zinc...) ; les cations sont retenus à la surface des particules argileuses et organiques (l'anion a gagné des électrons).

Chernozems : sols noirs, profondément enrichis en matières organiques, d'une grande fertilité ; complexe adsorbant élevé, saturé en calcium.

Complexe adsorbant : ensemble des constituants minéraux et organiques ayant la capacité de retenir à leur surface des cations, dont les principaux sont le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium, l'ammonium, mais aussi l'hydrogène, l'aluminium (en condition de forte acidité).

Cryosols : sols gelés des régions polaires.

Dégradation : modifications de certaines caractéristiques des sols provoquant des affaiblissements de leurs fonctions et de leurs performances.

Ferrallitiques (sols) : sols épais, rouges ou jaunes, des régions tropicales humides et équatoriales, plus ou moins argileux selon la roche-mère ; sur roche acide, le minéral argileux largement dominant est la kaolinite ; sur roche basique, c'est l'halloysite (nitisols).

Fersiallitiques (sols) : sols rouges ou bruns, calciques mais non calcaires, plus ou moins argileux (illite et smectite) selon les roches-mères, caractéristiques des milieux méditerranéens semi-arides et subhumides.

Gaz à effet de serre : composants gazeux de l'atmosphère qui retiennent les rayonnements émis par la surface de la terre ; les plus connus sont le dioxyde de carbone, le méthane, le protoxyde d'azote, l'ozone et la vapeur d'eau ; par le canal des activités biologiques, les sols échangent avec l'atmosphère ces composants gazeux.

Halloysite : minéral argileux voisin de la kaolinite mais à capacité d'échange plus élevée ; il est fréquent dans les sols des régions tropicales et équatoriales, sur roches basiques (basalte, calcaires)

Horizon : volume de sol caractérisé par sa morphologie (couleur, forme des agrégats, porosité) ; la plupart des horizons ont l'allure de couches superposées ; entre la roche-mère et la surface il peut y avoir de 1 à 10 horizons différents les uns des autres ; les limites qui séparent les horizons sont des fronts de transformation des structures de l'un des horizons par les structures de l'autre.

Hydromorphe : se dit d'un sol ou d'un horizon dont la morphologie et les caractéristiques physico-chimiques et biologiques sont influencées par un excès d'eau et par un manque d'Oxygène.

Illite : minéral argileux, riche en silice, moyennement gonflant, à capacité d'échange moyenne (retient assez bien les cations nutritifs) ; il est fréquent dans les sols des régions tempérées et méditerranéennes.

Kaolinite : minéral argileux, pauvre en silice, à faible capacité d'échange (retient peu de cations nutritifs) ; il est dominant dans les sols des régions tropicales et équatoriales.

Lessivés (sols) : sols très différenciés, lessivés en argile dans leurs horizons de surface ; ils sont fréquemment associés dans les paysages d'un côté à des sols bruns, de l'autre à des podzols.

Limons : particule minérale dont la taille est supérieure à 2 micromètres et inférieure à 50 micromètres.

Litière : horizon organique situé à la surface des sols forestiers.

Læss : roche limoneuse et calcaire formée, en milieu froid et aride, en conséquence de l'érosion et du transport éolien

Mangrove : formation arbustive des zones côtières et des estuaires des régions tropicales ; les sols, riches en matières organiques, sont salés et hydromorphes.

Matière organique : constituants organiques formés à partir des produits de l'activité biologique (déchets, organismes en voie de décomposition).

Milieu naturel : milieu non modifié par l'activité humaine ; il n'y a plus de milieux naturels sur la Terre, puisque partout la chimie de l'atmosphère a été modifiée en conséquence des activités humaines.

Monosiallitique : qualifie les sols au sein desquels les minéraux argileux qui se forment sont pauvres en silice ; ces minéraux argileux ont des capacités faibles d'échange en cations (kaolinite).

Montmorillonite : minéral argileux riche en silice, très gonflant, à forte capacité d'échange (retient bien les cations nutritifs) ; il est fréquent dans les sols des régions tropicales et méditerranéennes, dans les zones aval mal drainées.

Oligo-éléments : éléments nutritifs indispensables à la vie, animale, végétale, humaine, mais à des doses très faibles ; s'ils sont disponibles dans les sols en trop grandes quantités facilement assimilables, ils deviennent toxiques (exemples d'oligo-éléments : bore, manganèse, cuivre, zinc, fer...)

pH : le potentiel hydrogène mesure la concentration d'une solution en ions H^+ ; le pH oscille de 3,5 (très acide) à 10 (très basique).

Podzols : sols très appauvris, formés en milieu acide forestier, reconnaissables par la présence sous un horizon organique de surface d'un horizon lessivé en argile, blanc, sablo-limoneux, reposant sur un

horizon d'accumulation, noir et rouille, riche en humus et en hydroxydes de fer et d'aluminium ; en milieu tempéré et continental froid, les podzols ont quelques dizaines de centimètres d'épaisseur ; en milieu tropical humide et équatorial, ils peuvent atteindre plusieurs mètres d'épaisseur.

Porosité : vides créés et recréés, en permanence, au sein des sols, en conséquence de leur formation et de leur évolution ; on distingue : la porosité texturale (vides créés par l'assemblage des particules), la porosité structurale (vides créés par la formation des agrégats), la porosité biologique (vides créés par l'activité biologique).

Rankers : sols très minces (quelques centimètres) sur roches acides.

Rendzines et sols bruns calcaires : les rendzines sont des sols calcaires peu épais (quelques dizaines de centimètres), souvent caillouteux ; les sols bruns calcaires sont plus épais ; ces sols sont présents partout où les roches-mères sont riches en calcaire ; ils sont cependant plus rares en milieu tropical humide.

Roche-mère : roche à partir de laquelle le sol se forme ; la roche-mère se trouve à la base du sol, le plus souvent à quelques dizaines de centimètres de profondeur ; dans les régions chaudes et humides, la roche-mère peut n'apparaître qu'à plusieurs mètres, voire plusieurs dizaines de mètres de profondeur ; sur pente forte, les migrations

latérales font que les roches-mères peuvent se situer, en partie, à l'amont des sols auxquels elles donnent naissance.

Semelle de labour : quand on travaille un matériau-sol trop humide avec un instrument (charrue) mal réglé, un tassement local peut prendre naissance et gêner l'enracinement ainsi que la circulation de l'eau.

Smectite : minéral argileux, riche en silice, très gonflant, à forte capacité d'échange (retient bien les cations nutritifs) ; il est fréquent dans les sols des régions tropicales et méditerranéennes, dans les zones aval mal drainées (la montmorillonite est une smectite).

Solonchaks : sols dans lesquels s'est développée une forte accumulation de sels solubles.

Solonetz : sols dans lesquels du sodium s'est accumulé sur le complexe adsorbant ; les argiles sont dispersées par la présence du sodium : elles sont alors lessivées.

Structure : arrangement des constituants donnant naissance à des unités morphologiques élémentaires : agrégats, vides, nodules, revêtements, horizons... ; il y a trois types principaux de structures, correspondant à trois niveaux d'organisation et d'observation de la couverture pédologique : les organisations élémentaires, les horizons, les systèmes pédologiques.

Terrasse alluviale : le long des fleuves et des rivières, des périodes de sédimentation alluviale alternent avec des périodes d'enfoncement, donc d'érosion d'une partie des sédiments préalablement déposés ; ainsi prend naissance une géomorphologie en escalier, en « terrasses » emboîtées, les alluvions les plus anciennes rescapées des érosions constituant les étages les plus élevés du paysage.

Texture : composition d'un échantillon de sol en termes de teneurs en particules de diverses tailles.

Tourbes : sols très riches en matières organiques accumulées en milieu mal drainé ; les tourbes sont fréquentes dans les régions à climat froid et humides et dans les régions tropicales humides.

Vertisols : sols très argileux (smectite), de couleur sombre, caractérisés par la présence d'agrégats en forme de mottes à plaquettes obliques ; les vertisols sont très développés en milieu tropical et en milieu méditerranéen : ils sont riches, mais difficiles à travailler.

Photogravure Atelier 6 (Montpellier)
Achévé d'imprimer
sur les presses de l'imprimerie IME (France)
sur du papier 100 % PEFC
issu de forêts gérées durablement
Dépôt légal : novembre 2010

Les sols font partie de notre quotidien. Marquant les paysages de leur empreinte, étroitement associés au développement de la vie et des sociétés humaines, ils assurent aux êtres vivants le gîte et le couvert. Contribuant au recyclage des déchets organiques et à la régulation du cycle de l'eau, les sols constituent par ailleurs l'un des principaux réservoirs de carbone et jouent un rôle important dans l'équilibre climatique de la planète.

Mais les sols sont mal connus. Qui sont-ils ? Comment se forment-ils ? Quelles fonctions assurent-ils à l'égard des hommes et de l'environnement ? Dans quelle mesure les sols sont-ils menacés par l'urbanisation, la désertification, les pollutions agricoles et industrielles, l'intensification et l'uniformisation des pratiques culturales ? Ne sont-ils pas aujourd'hui en danger, à l'instar d'autres milieux naturels ?

Plus que jamais, il importe de faire découvrir ce milieu particulier, déterminant pour l'avenir de l'homme et de la biosphère. Tel est l'objectif de cet ouvrage largement illustré, accessible à tous, qui donne à voir et à comprendre les sols dans toute leur diversité afin de mieux les préserver.

***Alain Ruellan**, pédologue, est un ancien chercheur de l'IRD et a été professeur à l'Agrocampus de Rennes. Il a exercé dans plusieurs régions du monde, en particulier au Brésil, au Maroc et en Bretagne. Il a été directeur général de l'IRD et président de l'Association internationale de science du sol. Ses travaux concernent notamment la morphologie des sols ainsi que l'éducation à la découverte des sols. Il milite au sein de plusieurs associations en faveur de la solidarité internationale et du développement durable.*



IRD
44, bd de Dunkerque
13572 Marseille cedex 02
editions@ird.fr
www.editions.ird.fr

Diffusion IRD
32, av. Henri-Varagnat
93143 Bondy cedex
diffusion@ird.fr



28 €

ISBN 978-2-7099-1690-5

