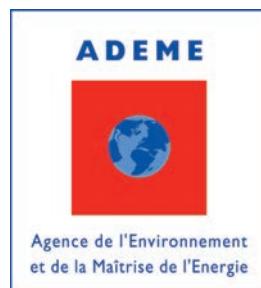


*Sous la direction de*  
**Michel-Claude Girard**  
**Christian Walter**  
**Jean-Claude Rémy**  
**Jacques Berthelin**  
**Jean-Louis Morel**



# Sols et environnement

**2<sup>e</sup> édition**



◆ **Un cours complet**  
◆ **Des exercices**  
◆ **Des suppléments en ligne**

➤ Master  
➤ Écoles d'ingénieurs  
➤ CAPES/AGREG

DUNOD

# TABLE DES MATIÈRES

Préface	IX
Avant-propos	XI

## PARTIE I

### LE SOL : ÉLÉMENT CENTRAL DE LA BIOSPHÈRE ET RÉGULATEUR DES GRANDS ÉQUILIBRES

Chapitre 1. Diversité et organisation de la couverture pédologique	3
Chapitre 2. Constituants originaux du sol : réactivité et interactions	39
Chapitre 3. La rhizosphère, interface entre le sol et la plante	66
Chapitre 4. Faune du sol et lombriciens dans les sols tempérés agricoles	85
Chapitre 5. Stockage et recyclage du carbone	108
Chapitre 6. Les sols et le cycle de l'eau	133
Chapitre 7. Les émissions par les sols des gaz à effet de serre CH <sub>4</sub> et N <sub>2</sub> O	151

## PARTIE II

### LES SOLS ET LES ACTIVITÉS HUMAINES

Chapitre 8. Paléosols et sols reliques : mémoires des climats	173
Chapitre 9. Les sols en milieu urbain	208
Chapitre 10. Terroirs viticoles et sols	237
Chapitre 11. Le fonctionnement des sols forestiers	259
Chapitre 12. Sols, fertilisation et environnement	283
Chapitre 13. Les défis du maintien de la fertilité des sols tropicaux : cas de l'Afrique de l'Ouest	310

## Table des matières

<b>PARTIE III</b>	
<b>LES FONCTIONS DES SOLS</b>	
<b>Chapitre 14. Le sol : ressource en nutriments et biodisponibilité</b>	<b>337</b>
<b>Chapitre 15. Bilan environnemental du phosphore</b>	<b>358</b>
<b>Chapitre 16. Les zones humides et leurs sols</b>	<b>378</b>
<b>Chapitre 17. L'acidification des sols</b>	<b>402</b>
<b>PARTIE IV</b>	
<b>LES SOLS ET LA GESTION DE L'ESPACE</b>	
<b>Chapitre 18. L'analyse spatiale des sols : description, modélisation et représentation de la variabilité spatiale des sols</b>	<b>427</b>
<b>Chapitre 19. La télédétection : méthode d'inventaire et de surveillance globale</b>	<b>454</b>
<b>Chapitre 20. Aménagement rural et gestion des excès d'eau</b>	<b>480</b>
<b>PARTIE V</b>	
<b>LES SOLS : MENACES, PRÉVENTION, RÉHABILITATION</b>	
<b>Chapitre 21. Indicateurs de la qualité des sols</b>	<b>509</b>
<b>Chapitre 22. Ingénierie écologique des sols</b>	<b>528</b>
<b>Chapitre 23. Le sol et son rôle dans l'impact de la radioactivité sur l'environnement</b>	<b>547</b>
<b>Chapitre 24. Présence et impact des éléments en traces dans les sols</b>	<b>574</b>
<b>Chapitre 25. Pollutions diffuses : mobilité et persistance des polluants organiques dans les sols</b>	<b>597</b>
<b>Chapitre 26. Pollutions organiques agricoles, urbaines ou industrielles : cas des hydrocarbures aromatiques polycycliques</b>	<b>620</b>

<b>Chapitre 27. Recyclage de déchets sur les sols : valeur agronomique et impacts environnementaux</b>	<b>637</b>
<b>Chapitre 28. Microflore des sols : intérêts et dangers pour les plantes, les animaux et l'homme</b>	<b>661</b>
<b>Chapitre 29. Dégradation et régénération de la structure des sols cultivés</b>	<b>686</b>
<b>Chapitre 30. L'érosion des sols</b>	<b>708</b>
<b>Chapitre 31. Sols salés et environnement</b>	<b>729</b>

PARTIE VI

LES SOLS ET LES SCIENCES SOCIALES

<b>Chapitre 32. Politique d'utilisation des sols</b>	<b>751</b>
<b>Chapitre 33. Sol, environnement, société : fonctions, patrimoine, politiques</b>	<b>774</b>
<b>Chapitre 34. Les sols et le droit</b>	<b>798</b>
<b>Chapitre 35. Aspects économiques des sols</b>	<b>817</b>
<b>Chapitre 36. La ressource en sols : menaces, nouveaux enjeux et mesures de protection</b>	<b>833</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>859</b>
<b>Index</b>	<b>865</b>

## Partie I

# Le sol : élément central de la biosphère et régulateur des grands équilibres

Les sols (chapitre 1) sont, avec les océans, l'un des deux « compartiments » essentiels à la vie terrestre : leurs constituants spécifiques minéraux et organiques (chapitre 2), leurs solutions, leurs « atmosphères », leurs organismes vivants (micro-organismes, faune – chapitre 4, plantes), leur diversité, tant structurale que fonctionnelle, et leurs organisations contribuent au développement d'une biosphère, abondante et très diversifiée. Les sols présentent en effet des conditions très favorables (énergétiques, nutritionnelles, hydriques, thermiques, acido-basiques...) au développement de la vie. Ils hébergent tous les principaux groupes d'organismes (micro-organismes, animaux, végétaux).

Certains sites des sols comme les rhizosphères (chapitre 3), interfaces entre les racines des plantes et le sol, sont des lieux d'activités biochimiques fortes et d'échange de matières avec des vitesses réactionnelles rapides. En raison de leurs activités bio-physico-chimiques et de leur structure, les sols sont des « réacteurs » régulateurs des grands cycles biogéochimiques comme le cycle du carbone (chapitre 5) et de l'azote et dans une moindre mesure du phosphore, du soufre, du fer..., essentiellement grâce aux communautés microbiennes qui assurent, même en conditions extrêmes, la transformation de ces éléments... des états les plus réduits aux états les plus oxydés (de  $\text{CH}_4$  à  $\text{CO}_2$ , de  $\text{N}_2$  à  $\text{NO}_3^-$ , de  $\text{S}^-$  à  $\text{SO}_4^{2-}$ , de  $\text{FeII}$  à  $\text{FeIII}$ ...) en contribuant aussi

## **Le sol : élément central de la biosphère et régulateur des grands équilibres**

à la formation et la dégradation des composés organo-minéraux plus ou moins complexes (chapitre 7).

Les sols sont impliqués dans la dynamique et la qualité des eaux qu'ils reçoivent par les précipitations atmosphériques, puis répartissent essentiellement par infiltration (alimentation des nappes), évapotranspiration (retour à l'atmosphère), et ruissellement (retour direct aux eaux de surface et aux océans) (chapitre 6).

Ce sont des systèmes accumulateurs (matières organiques, métaux...), des systèmes sources (nutriments, polluants, eaux...), des systèmes transformateurs (bio-dégradation, biosynthèse, oxydation, réduction...), des systèmes transferts (vers l'hydrosphère, la biosphère, l'atmosphère...) indispensables au fonctionnement des écosystèmes continentaux.

Jacques Berthelin

# CONSTITUANTS ORIGINAUX DU SOL : RÉACTIVITÉ ET INTERACTIONS\*

2

## 2.1 INTRODUCTION

Les sols constituent avec les océans, l'un des deux grands compartiments originaux du globe terrestre, où la vie est particulièrement active. C'est un milieu vivant et dynamique, mais plus complexe que les océans, en raison de la diversité de ses constituants, des organismes qu'il renferme et de ses organisations structurales et spatiales variées. Les sols résultent de l'altération, du remaniement et de l'organisation des couches superficielles des continents sous l'action des organismes vivants (biosphère), de l'hydrosphère, de l'atmosphère et des échanges de matières et d'énergie (dont la gravité) qui s'y manifestent. D'un point de vue fonctionnel, les sols peuvent être définis comme des systèmes dynamiques, complexes, quadridimensionnels (espace-temps), qui comprennent cinq types de « constituants » principaux : matières solides minérales, organiques, organismes vivants (plantes, faune, micro-organismes), solutions, gaz, qui interagissent plus ou moins fortement entre eux (figure 2.1).

Les propriétés des sols, les processus qui s'y manifestent et leur régulation, leurs rôles dans les orientations et les couplages des cycles biogéochimiques des systèmes sol-plante et des écosystèmes continentaux en général, les implications de leur mode de fonctionnement sur la qualité des eaux, des productions végétales et de l'atmosphère... dépendent et résultent entre autres :

- d'interactions fortes entre les constituants minéraux les plus réactionnels (**minéraux argileux**, oxydes de fer, d'aluminium, de manganèse), les matières organiques, les solutions, les organismes (micro-organismes et faune) et les racines des plantes,
- des géométries des **organisations structurales**, poreuses, hétérogènes, discontinues qui se mettent en place de l'**agrégat** micrométrique aux **pédopaysages**,
- des transferts de matières et d'énergie qui s'y déroulent.

Ces deux derniers points dépendent eux-mêmes des interactions mentionnées ci-dessus.

\* Jacques Berthelin (CNRS), Francis Andreux (université de Dijon), Colette Munier-Lamy (CNRS).

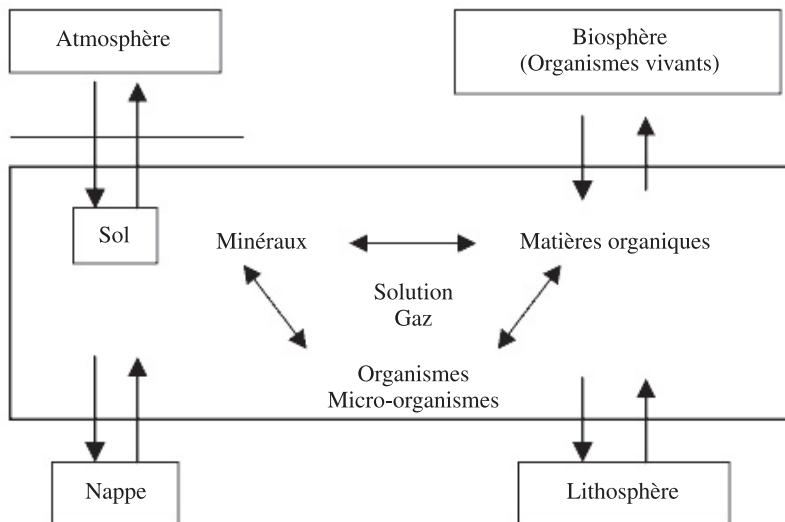


Figure 2.1- Les sols : bioréacteurs interactifs, multiphasiques à l'interface atmosphère-hydrosphère-biosphère-lithosphère.

On souligne ici l'impact fondamental et appliqué des interactions dues aux constituants les plus réactionnels et en particulier à leurs **propriétés de surface** ainsi qu'à la présence et à la diversité des organismes (et entre autres des micro-organismes). On présente d'abord de manière simplifiée la nature et les propriétés essentielles de ces « constituants réactionnels » et des organismes les plus impliqués (micro-organismes).

Cette présentation insiste sur les propriétés de surface (capacité d'échange, **charges variables**, capacité de **complexation...**) et les propriétés colloïdales (**dispersion-flocculation**) de ces constituants. L'impact des conditions physico-chimiques du milieu (pH, **Redox...**), contrôlées fondamentalement par les activités microbiennes, facteur clé du fonctionnement des cycles biogéochimiques est aussi souligné. On illustre schématiquement quelques-unes de ces interactions par des résultats de diverses observations de terrain ou d'expériences aux champs ou au laboratoire. Des compléments sont fournis par d'autres chapitres indiqués dans le texte. Enfin une conclusion propose quelques réflexions et problématiques.

## 2.2 LES CONSTITUANTS MINÉRAUX

Les sols présentent la particularité de renfermer des **minéraux primaires** (quartz, feldspaths, micas...) non ou peu altérés, et des minéraux ou phases minérales et organo-minérales secondaires. Ces **minéraux secondaires**, sont la résultante de

phénomènes de transformation des minéraux primaires ou de néoformation de minéraux (par exemple : oxydes, argiles).

Les phases minérales secondaires, qui constituent ce que l'on désigne aussi par **complexe d'altération**, comprennent des minéraux argileux, des oxyhydroxydes de fer, d'aluminium, de manganèse rarement purs et bien souvent associés à des matières organiques de type humique, elles mêmes en cours de transformation.

### 2.2.1 Les oxydes

Le terme oxyde désigne le plus souvent dans les sols, l'ensemble des **oxydes, oxyhydroxydes, hydroxydes**. Les oxydes de fer, d'aluminium, de manganèse sont le plus souvent des minéraux de néoformation. Les structures cristallochimiques octaédriques de ces oxydes présentent des arrangements sensiblement différents, fonction de l'organisation des **feuilles octaédriques** et du type d'empilement des plans d'anions ( $O^{2-}$  et  $OH^-$ ) qui constituent la charpente de ces minéraux et occupent la plus grande partie du volume des minéraux (Herbillon, 1994 ; Schwertmann, 1991 ; McBride, 1994 ; Calvet, 2003).

Les oxydes et oxyhydroxydes de fer : **hématite**  $\alpha Fe_2O_3$ , **maghémite**  $\gamma Fe_2O_3$  ; **goethite**  $\alpha FeOOH$ , **lepidocrocite**  $\gamma FeOOH$  ; **ferrihydrite**  $5Fe_2O_3 \cdot 9H_2O$ , sont plus diversifiés et plus répandus que les oxydes et oxyhydroxydes d'aluminium dont la **gibbsite**  $Al(OH)_3$  est la plus fréquente. La **boehmite**  $\alpha AlOOH$  et plus encore la **nordstrandite** (famille des hydroxydes) sont relativement peu fréquentes.

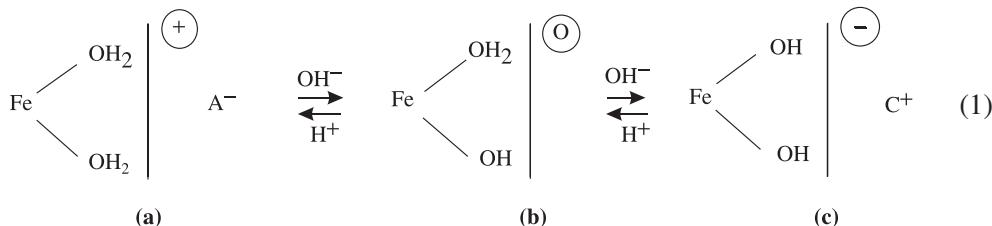
Les oxydes d'aluminium présentent des structures cristallochimiques plus simples que les oxydes de fer, car très peu affectés par la **substitution** de l'ion  $Al^{3+}$  par d'autres cations. En revanche, les oxydes de fer peuvent être fortement substitués par d'autres cations de **rayons ioniques** voisins. Le Fe III de l'hématite, de la goethite, de la ferrihydrite peut respectivement présenter un taux maximal de substitution alumineuse de 16, 33, 15 %. Ainsi les oxydes de fer peuvent être de véritables puits et sources de métaux (Al, Cr, Ni, Co...). Les oxydes de fer présentent aussi d'importantes différences de cristallinité entre ceux qui sont ou peuvent être bien cristallisés (par exemple, goethite, hématite) et ceux qui possèdent une structure avec de nombreux défauts (par exemple, ferrihydrite). La stabilité et la réactivité des minéraux sont liées à leur degré de **cristallinité** : la stabilité chimique est d'autant meilleure que la cristallinité est élevée. C'est l'inverse pour la réactivité d'autant plus élevée que la cristallinité n'est pas parfaite.

Les propriétés de surface (**surfaces spécifiques**, charges) des oxydes et en particulier des oxydes de fer sont à souligner. Les oxydes de fer sont des minéraux finement divisés de très petites tailles, quelques dizaines à quelques centaines d'Angstroms ( $\text{\AA}$ ), présentant de grandes surfaces spécifiques développées allant de 60 à 600  $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  des hématites aux ferrihydrites. Les oxydes d'aluminium sont de

plus grandes tailles (micrométriques) et présentent donc des surfaces spécifiques plus faibles et par ailleurs moins bien connues que celles des oxydes de fer.

Les oxydes de fer et d'aluminium sont des minéraux à charges de surface variables, déterminées par le pH et la nature (composition en électrolytes) des solutions du sol (Herbillon, 1994 ; Mc Bride, 1994 ; Calvet, 2003). En fonction du pH, ils sont soit échangeurs d'anions (à bas pH), soit neutre (point isoélectrique), soit échangeurs de cations (à pH élevés). Les valeurs du **point isoélectrique** correspondent à des pH élevés, de 8 à 9 pour les oxydes de fer et de 7 à 9 pour les oxydes d'aluminium. On constate donc, que pour la plupart des sols, dont les pH sont inférieurs à ceux des points isoélectriques, les oxydes de fer et d'aluminium seront chargés positivement et participent à la rétention d'anions ( $A^-$  = chlorures, nitrates, phosphates, sulfates, organiques).

L'ensemble des réactions (1) représente, de manière simplifiée, ces divers états et propriétés d'échange des oxydes de fer ( $A^-$  = anions ;  $C^+$  = cations). Dans le schéma réactionnel (1), les traits verticaux représentent la surface d'un oxyde de fer avec des charges positives (+) en milieu acide (**a**), neutres au point isoélectrique (**o**) (**b**) et chargées négativement (-) en milieu alcalin (**c**).



Des sites de surface de ces minéraux présentent des groupements  $-\text{Fe}-\text{OH}_2$  et  $-\text{Al}-\text{OH}_2$  faiblement acides (en milieu acide ou légèrement acides) pour des valeurs inférieures au point isoélectrique. Ils possèdent alors des charges positives ( $-\text{Fe}-\text{OH}_2^{0,5+}$ ), et sont échangeurs d'anions ( $\text{A}^-=\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{R COO}^-$ ...) qui se fixent sur leur surface ( $\text{R}$  = radical organique).

Pour des valeurs correspondant au point isoélectrique, les charges de surface sont nulles. Pour des pH dont les valeurs sont supérieures au point isoélectrique (en milieu alcalin), ces groupements se dissocient ( $\text{---Fe---OH}_2^{0,5+} \rightarrow \text{---Fe---OH}^{0,5-} + \text{H}^+$ ) et deviennent échangeurs de cations ( $\text{C}^+ = \text{Cu}^{2+}, \text{Ni}^{2+}, \text{Ca}^{2+}, \text{Cd}^{2+} \dots$ ).

L'équation simplifiée (2) schématise un échange de ligand organique ( $R-COOH$ ) sur un groupement  $-Fe-OH$  de surface d'oxyhydroxyde



Les sites de surface pourront aussi participer à des phénomènes d'adsorption spécifiques correspondant à des fixations de cations par échange de ligands (sulfate,

# INDICATEURS DE LA QUALITÉ DES SOLS\*

21

## 21.1 INTRODUCTION

Les sols sont en perpétuelle évolution et l'une des principales causes en sont les activités humaines : aménagements, pratiques culturales ou forestières, apports diffus de contaminants par des dépôts atmosphériques ou des épandages de déchets. Ces pressions vont s'accentuer puisque la demande en terre va augmenter pour répondre aux besoins liés à la croissance démographique mondiale (FAO, 2008) qui va générer des demandes en surfaces pour l'alimentation (ex : cultures et élevage), l'énergie (ex : agrocarburants et bois), l'épuration (ex : déchets et eaux) et l'infrastructure (ex : bâti et infrastructures de communication) ce qui nécessairement induira des conflits pour l'occupation des sols. Il faudra utiliser les sols pour bâtir et pour nourrir, pour s'alimenter et pour se déplacer. Si l'affectation des sols est réfléchie à court terme (retournement des prairies, mise en culture d'espaces naturels après déforestation, imperméabilisation des sols les plus productifs) et si leur exploitation intensifie les pratiques agricoles actuelles, la dégradation des sols (érosion, baisse de la matière organique et de la diversité) déjà observée aux niveaux mondial et européen devrait se poursuivre contribuant par là même à une altération de l'environnement (contamination des cours d'eau, accélération du changement climatique).

Ainsi, des indicateurs sont nécessaires pour renseigner sur l'état et les propriétés des sols pour caractériser leurs fonctionnements afin de les affecter à un meilleur usage ou pour suivre et surveiller leur évolution. Un cadre conceptuel reste à construire pour porter un jugement sur les valeurs mesurées par ces indicateurs et ainsi apprécier la qualité des sols.

## 21.2 LE CONCEPT DE QUALITÉ DES SOLS

La qualité des sols est un concept relativement récent puisque l'essentiel des travaux théoriques a été initié dans les années 1990. On parlait depuis les années 1960 de « vocation des sols » ou de « contraintes pédologiques et agronomiques ». Diverses

quantifications ont été proposées (INRA, FAO, INA P-G., etc.). Déterminer la qualité d'un sol nécessite de développer un cadre méthodologique et donc d'abord de définir ce que recouvre le terme « qualité », de préciser le ou les indicateurs possibles et de définir des valeurs de référence pour interpréter les valeurs mesurées.

### 21.2.1 Qualité ou santé des sols ?

En 1977, Warkentin et Fletcher ont suggéré de développer le concept de qualité des sols en raison des multiples fonctions des sols (ils listaient alors : la production de nourriture et de fibres, la récréation et le recyclage ou l'assimilation des déchets et sous-produits). Ils soulignaient déjà que (1) les sols sont évalués dans le cadre d'usages assez différents, (2) de multiples groupes d'utilisateurs sont intéressés par les ressources en sols ; (3) les priorités et exigences de la société vis-à-vis des ressources en sol changent et (4) des décisions d'utilisation des ressources en sol sont prises dans un contexte humain et institutionnel. Ils précisaient également qu'en raison de la diversité des sols et donc de leurs différences intrinsèques, il n'y avait aucune mesure (ou indicateur) universelle pour évaluer la qualité des sols. Au cours des années 1990, ce concept de qualité des sols a beaucoup été travaillé et de nombreuses définitions ont été proposées, souvent dépendante de l'utilisateur et notamment de son intérêt vis-à-vis du sol, suivant qu'il considère le sol comme moyen de production végétale, comme support ou comme ressource naturelle non renouvelable.

Au niveau international, cette expression « qualité du sol » (*soil quality*) est souvent confondue (voire parfois opposée) au concept de santé du sol (*soil health*). Cette dernière perception anthropocentrique de qualité correspond à une vision holistique du sol qui recouvre sa capacité à maintenir à long terme l'ensemble de ses propriétés et de ses fonctions, indépendamment d'un usage particulier. La biodiversité des sols, par exemple, n'est pas capitale pour la fonction de production végétale alors même qu'elle est cruciale pour maintenir à long terme les fonctions des sols. La notion de santé des sols reste difficile à définir puisqu'elle recouvre l'intégralité des propriétés et des fonctions des sols. Il est généralement plus simple de définir la « non-santé » (ou « maladie » ou « fatigue ») des sols en mettant en évidence des altérations de ses propriétés et/ou fonctions.

La notion de qualité exige de définir l'usage du sol et le bénéficiaire final alors même que la notion de santé s'établit indépendamment des usages et des utilisateurs, en considérant le sol comme une ressource (un capital), non renouvelable au pas de temps humain, devant assurer et conserver l'ensemble de ses fonctions. D'un point de vue opérationnel, il est donc plus aisé de parler de qualité des sols en identifiant un ou des usages précis que de rester à un niveau trop général incluant tous les usages possibles (même si cela serait préférable pour préserver la multifonctionnalité des sols). La qualité du sol est reliée à un usage et à un besoin exprimé par l'homme dans

un contexte climatique et pédologique. Il n'y a donc pas une qualité des sols mais des qualités qui dépendent de ce qu'on attend d'un sol dans une situation donnée. La définition proposée par Doran et Parkin en 1994 reconnaît les multiples utilisations des sols et définit la qualité des sols comme la « *capacité d'un type de sol à fonctionner au sein d'un écosystème et d'un usage, permettant la production biologique, le maintien de la qualité de l'environnement et la préservation de la santé des plantes, des animaux et de l'Homme* ». Cette définition, qui considère la vocation productive des sols intègre également la qualité plus générale de l'environnement. Il est peu question des autres usages des sols comme par exemple le support des infrastructures terrestres.

### 21.2.2 Le cadre conceptuel d'évaluation de la qualité des sols

L'évaluation de la qualité de sols nécessite de donner une appréciation sur l'état et l'évolution des nombreux paramètres et fonctions des sols. Compte tenu de la complexité du système, il a été proposé de structurer cette démarche en 3 étapes distinctes (figure 21.1) :

- Définition de l'usage du sol souhaité et donc des fonctions ou des processus à privilégier ou à surveiller
- Choix d'indicateurs pertinents qui vont renseigner sur l'état et l'évolution des fonctions et des processus
- Interprétation et intégration des résultats

Cette démarche débute par la définition de l'usage des sols et donc par les services que l'on souhaite lui voir fournir. Blum et Santelises (1994) proposent différents usages possibles des sols, séparés en 2 catégories de services : les services écologiques (A) et les services pour les activités humaines (B). Ainsi, les services écologiques rendus par les sols sont (A1) la production de biomasse (alimentation, fibre et énergie), (A2) le rôle de réacteur protégeant l'eau et la chaîne alimentaire des contaminants par sa capacité à filtrer, tamponner et dégrader les contaminants, et (A3) l'habitat et le réservoir de biodiversité pour de nombreux organismes. Pour les services liés aux activités humaines, ils listent que le sol est (B1) un milieu physique, support de nos infrastructures et de notre activité économique, (B2) une source de matériaux et (B3) qu'il fait partie de notre héritage paysager et culturel préservant les vestiges paléontologiques et archéologiques de l'humanité. Ces services sont d'ailleurs ceux repris dans le projet de directive cadre pour la protection des sols (COM(2006)-232).

En fonction de l'usage du sol et donc des services que l'on souhaite lui voir rendre, les fonctions ou processus à privilégier peuvent être différents. Ainsi, la qualité d'un

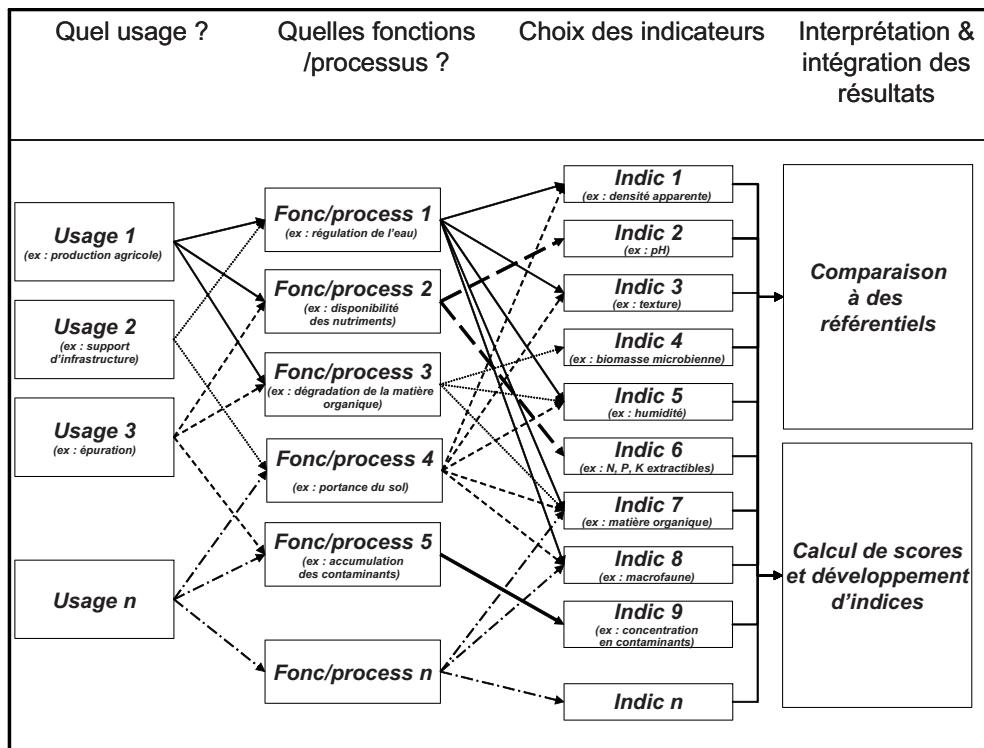


Figure 21.1- Le cadre conceptuel de l'évaluation de la qualité des sols (adapté de Andrews *et al.*, 2004).

sol à être le support d'une infrastructure est différente de celle pour la production agricole. Elle peut même varier pour un même usage : la qualité du sol à supporter une culture de céréales peut être différente de celle à supporter une culture de betterave ou de pommes de terre... La qualité va dépendre d'un ensemble de facteurs externes et fluctuants tels que l'usage, mais également par exemple : des pratiques agricoles liées aux pédopaysage et à la formation des agriculteurs ; des priorités économiques liées aux incitations politiques ; des interactions sociales au sein d'un territoire. Ainsi, la qualité des sols n'est pas obligatoirement stable dans le temps et dépendra des usages qui seront privilégiés à un instant donné. Doran et Safley (1997) proposent de rester attentifs, lors de la définition des fonctions ou processus à privilégier (et donc des indicateurs à suivre) puisque l'usage peut être amené à changer. Il s'agit donc d'avoir une vision assez large lors du choix des indicateurs afin de garantir une certaine multifonctionnalité des sols. L'exemple d'utiliser les sols comme des stocks de carbone en lien avec la lutte contre le changement climatique est assez illustratif des modifications d'usage et de fonction demandées au sol : il y a seulement 10 ans ce

service n'était même pas envisagé alors qu'il fait actuellement l'objet d'une demande forte...

Les indicateurs de caractérisation et de suivi des sols peuvent donc être différents en fonction de l'usage donné au sol (la mesure de la contamination est essentiellement effectuée en lien avec le recyclage des eaux et des déchets) ou au contraire communs à plusieurs fonctions (la matière organique par exemple est un indicateur très souvent mesuré compte tenu de ses multiples rôles dans l'état et le fonctionnement du sol) (figure 21.1). Ces indicateurs doivent permettre d'accéder, le plus simplement possible, à l'état et à l'évolution du système mais ils sont également des leviers de contrôle pour le suivi des actions de gestion. Afin de faciliter l'interprétation des résultats il faut ensuite définir des méthodes d'expression des données et/ou constituer des référentiels qui seront utilisés pour qualifier la qualité des sols en lien avec le type de sol, de climat et d'usage. Toutes ces actions sont globalement comparables avec les examens médicaux : à partir d'une série de mesures (par exemple : température, tension, analyses de sang) et de référentiels pour chaque mesure, les médecins sont généralement capables de diagnostiquer au moins un état général si ce n'est une maladie précise.

## 21.3 QUELS INDICATEURS POUR L'ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES SOLS ?

Si la plupart des indicateurs recommandés dans la littérature scientifique et technique sont basés sur des analyses physico-chimiques et biologiques des sols, il convient de garder en mémoire que de tout temps les utilisateurs des sols et notamment les agriculteurs ont défini des indicateurs pour juger de la qualité de leurs sols (par exemple pour le remembrement une valeur en points est donnée). Ces indicateurs, faciles d'accès, basés sur la description des sols ou l'enregistrement des rendements, permettaient et permettent encore, notamment dans les pays en voie de développement de juger de la qualité des sols.

### 21.3.1 Les indicateurs basés sur l'observation des sols et des rendements

L'observation des sols et de certaines de leurs propriétés simples à apprécier comme par exemple la couleur, la texture, la pierrosité, la profondeur a permis à des générations d'agriculteurs de juger la qualité de leurs sols (donnant d'ailleurs parfois naissance à des noms vernaculaires et de lieux-dits comme : les terres jaunes, les terres noires, les terres grasses, les terres boues, champ de pierre). Une autre série d'indicateurs concerne plus directement les résultats obtenus sur les sols comme par

exemple le rendement et la qualité des cultures ou même le travail nécessaire à obtenir ce résultat.

Les techniques visuelles d'observation du sol sont toujours utilisées car facilement transférables aux agriculteurs. Ainsi, par exemple, en Nouvelle Zélande, différentes publications réalisées par Shepherd et al. (2000) (disponibles sur le site internet <http://www.landcareresearch.co.nz/research/soil/vsa/index.asp>) permettent une évaluation de la qualité de sols moins analytique, basée principalement sur un examen visuel du sol (chapitre 29). Les quatre volumes brochés publiés décrivent différents indicateurs et établissent sur la base de photographies et de commentaires les critères permettant aux évaluateurs de juger de la qualité des sols en attribuant une note (0, 1 ou 2 pour respectivement pauvre, modéré ou bon). Des caractéristiques inhérentes du site intégrant l'utilisation et le type de sol, la texture, l'état d'humidité et les conditions atmosphériques saisonnières sont également enregistrées. Les points forts de cette évaluation sont, d'une part, qu'elle utilise plusieurs critères morphogénétiques traditionnels des sols (ex : structure, porosité, couleur) en tant qu'indicateurs principaux et que, d'autre part, les auteurs ont fourni une aide à la compréhension pour les interprétations des propriétés ou processus qui sont reflétés par chaque indicateur. Par exemple : la distribution de la taille des agrégats secs évaluée à travers la structure du sol est reliée avec : la vitesse de diffusion de l'oxygène, la perméabilité à l'air, la conductivité hydraulique, la porosité et le rendement des cultures. Cet outil permet de lier une approche éducative relativement simple avec une base scientifique. C'est un outil utile pour l'autodétermination et l'autorégulation à la ferme qui nécessiterait un nouvel examen à pour une application dans d'autres pays où les sols sont plus diversifiés.

Ces indicateurs visuels, progressivement abandonnés par l'agriculture moderne au profit d'analyses de sol, restent encore très utilisés dans certaines parties du monde où ces technologies ne sont pas encore accessibles, comme l'illustre l'analyse bibliographique relative à l'ethnopaléontologie réalisée par Barrera-Bassols et Zinck (2003). Cette étude compare les critères de classification des sols et donc les indicateurs utilisés par 62 groupes ethniques répartis dans 25 pays d'Afrique, d'Asie et d'Amérique. Elle conclut que la couleur et la texture sont utilisées par l'ensemble des groupes ethniques, que l'humidité du sol est prise en compte par plus de la moitié des groupes, que la matière organique, la pierrosité et le drainage sont considérés par 30 à 50 % des groupes et que la productivité végétale, la facilité de travail, la structure, la profondeur et la température du sol par moins de 25 % des groupes. Ces indicateurs robustes permettent globalement de hiérarchiser la qualité des sols d'une manière comparable à celle utilisées par les chercheurs en sciences du sol, utilisant l'analyse d'indicateurs physiques ou chimiques. Ainsi, Mairura *et al.* (2007) ont mis en évidence que les classifications proposées par les agriculteurs au Kenya sur la base d'indicateurs tels



*Sous la direction de*

Michel-Claude Girard ■ Christian Walter  
Jean-Claude Rémy ■ Jacques Berthelin  
Jean-Louis Morel

- MATHÉMATIQUES
- PHYSIQUE
- CHIMIE
- SCIENCES DE L'INGÉNIER
- INFORMATIQUE
- SCIENCES DE LA VIE
- SCIENCES DE LA TERRE

## Sols et environnement

Ce manuel est destiné aux étudiants en Masters et en Écoles d'ingénieurs (Environnement, Agronomie, Sciences de la Terre). Il sera également utile aux professionnels de l'environnement : pédologues, agronomes, urbanistes, hydrogéologues, géologues, ingénieurs, aménageurs...

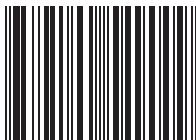
Cette nouvelle édition développe tous les aspects des défis environnementaux de demain. En effet, les sols sont un élément capital de l'environnement : ils stockent les déchets, épurent les substances toxiques, purifient l'eau et contribuent à la séquestration des gaz à effet de serre. Les sols ont également un rôle sociétal que l'ouvrage aborde à travers les disciplines de la sociologie, du droit et de l'économie. On y trouvera également un chapitre sur les indicateurs de la qualité des sols.

### Contenu :

Le sol, élément central de la biosphère et régulateur des grands équilibres ■ Les sols et les activités humaines ■ Les fonctions des sols ■ Les sols et la gestion de l'espace ■ Les sols : menaces, prévention, réhabilitation ■ Les sols et les sciences sociales.

Des suppléments sont disponibles sur les sites Internet de l'AFES (association française pour l'étude des sols) et de DUNOD.



  
9782100549009

6699656  
ISBN 978-2-10-054900-9

LICENCE 1 2 3 4 5 MASTER 6 7 8 DOCTORAT



**2<sup>e</sup> édition**

### Michel-Claude Girard

est professeur émérite à AgroParisTech, il est également membre de l'Académie d'agriculture de France.

### Christian Walter

est professeur à Agrocampus Ouest (École Nationale Supérieure Agronomique de Rennes).

### Jean-Claude Rémy

est professeur honoraire à SupAgro (École Supérieure Agronomique de Montpellier).

### Jacques Berthelin

est directeur de recherche émérite au CNRS de Nancy.

### Jean-Louis Morel

est professeur à l'ENSAIA-INPL de Nancy.

Code Ademe : 7048

