
Caractérisation de l'état des sols

1.1. Les sols au cœur de la zone critique

1.1.1. Définitions

La *zone critique* s'étend de la basse atmosphère aux roches non altérées [NRC 01, LIN 10]. Elle comprend donc la végétation, la faune, les sols et les nappes. Sans elle, l'humanité ne pourrait pas survivre, d'où le terme de critique [LIN 10, NRC 01].

Selon le dictionnaire Larousse, le *sol* constitue la couche superficielle de l'écorce d'une planète tellurique (comme la Terre et Mars). En français, le terme « sol » a également bien d'autres sens comme « surface », dans « personnel au sol » ou État dans « droit du sol¹ », etc. Le pluriel « les sols » est souvent préféré par les spécialistes du sol pour souligner la diversité de natures et de propriétés des sols qui constituent un continuum désigné par le terme de « couverture pédologique ».

1.1.2. Fonctions et services des sols

Le premier ouvrage de la même série *Les sols* porte sur les fonctions et services des sols. Les fonctions concernent les écosystèmes, les services l'humanité. Cette distinction est toutefois discutable puisque les fonctions écosystémiques, pour la plupart, constituent aussi des services. Inversement, la priorité donnée à un seul service (par exemple la production agricole intensive) peut nuire à certaines fonctions (par exemple l'épuration

Chapitre rédigé par Christian VALENTIN.

1. Voir chapitre 1 de l'ouvrage *Les sols au cœur de la zone critique : fonctions et services*.

de l'eau). À la faveur de l'année internationale des sols, la FAO a dressé en 2015² une liste de onze fonctions et services :

- régulation des cycles biogéochimiques (C, N, O, Al, Si, P, S, Mn, Fe, Cu...) et des nutriments³ ;
- séquestration du carbone atmosphérique⁴ ;
- régulation climatique (voir le volume *Les sols au cœur de la zone critique : fonctions et services*) ;
- régulation du cycle de l'eau⁵ et des inondations ;
- épuration de l'eau⁶ et diminution de la contamination des sols ;
- réservoir et habitat pour les organismes du sol⁷, dont certains peuvent être pathogènes comme les bacilles terrigènes, par exemple *Burkholderia pseudomallei* responsable de la mélioiïdose, maladie souvent mortelle [MAN 17] ;
- production de nourriture, de fibres et d'agrocarburants⁸ ;
- ressources pharmaceutiques et de gènes [BER 06, NES 15] ;
- support des infrastructures⁹ ;
- fourniture de matériaux de construction¹⁰ ;
- mémoire culturelle¹¹, notamment en termes d'archives archéologiques.

2. Disponible à l'adresse : <http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/en/c/284478/>.

3. Voir chapitre 3 de l'ouvrage *Les sols au cœur de la zone critique : fonctions et services*.

4. Voir les ouvrages *Les sols au cœur de la zone critique : fonctions et services* et *Les sols au cœur de la zone critique : écologie*.

5. Voir chapitre 2 de ce volume, le chapitre 3 de l'ouvrage *Les sols au cœur de la zone critique : fonctions et services* et les volumes 3 et 4, *Circulation de l'eau* et *Qualité de l'eau*.

6. Voir chapitres 7, 8 et 9 de ce volume et les volumes 3 et 4, *Circulation de l'eau* et *Qualité de l'eau*.

7. Voir l'ouvrage *Les sols au cœur de la zone critique : écologie*.

8. Voir chapitres 5, 6 et 7 de l'ouvrage *Les sols au cœur de la zone critique : fonctions et services*.

9. Voir chapitre 8 de ce volume et chapitre 9 de l'ouvrage *Les sols au cœur de la zone critique : fonctions et services*.

10. Voir chapitre 9 de l'ouvrage *Les sols au cœur de la zone critique : fonctions et services*.

11. Voir chapitre 11 de l'ouvrage *Les sols au cœur de la zone critique : fonctions et services*.

Cette liste est loin d'être exhaustive, le sol rendant bien d'autres services. Il intervient par exemple aussi sur la qualité de l'air (voir chapitre 3 de ce volume). Il offre à l'Homme depuis des dizaines de milliers d'années un lieu de sépulture, constitue un élément de mythes et entre dans des rites¹².

1.1.3. Dégradation des sols, des terres, désertification

La dégradation des sols est définie comme un changement de leur état qui entraîne une diminution de leur capacité à fournir des biens et services¹³. La FAO se réfère à l'état de santé du sol, terme qui reflète une vision anthropomorphique. Si le sol est bien un milieu vivant, la couverture pédologique n'est pas un individu qui pourrait être « malade » ou « mourir », puisqu'il s'agit d'un continuum en évolution. En revanche, le sol peut effectivement subir des dégradations ; ses horizons meubles peuvent même disparaître sous l'effet de l'érosion. Il semble plus correct, et au demeurant plus fréquent, de se référer à la qualité du sol. Au demeurant, même un sol artificialisé peut fournir des services, comme le montre le chapitre 8 de ce volume. Dès lors, un sol profondément transformé, comme un sol urbain, peut ne pas être considéré comme « très dégradé » s'il a suffisamment pu maintenir ou reconstituer plusieurs propriétés importantes (activités bactériennes et mésofauniques, enzymatiques, porosité suffisante pour infiltration, éléments nutritifs, etc.) susceptibles de fournir des services écosystémiques.

La dégradation des terres recouvre un concept plus large, mais aussi plus flou, puisque ce terme, qui correspond à la traduction en français de *land degradation*, désigne aussi bien la part solide de la surface de la Terre (par opposition aux surfaces liquides) que le sol ou l'ensemble des ressources de la zone critique.

La désertification est le processus de dégradation des terres dans les zones arides et semi-arides. C'est un terme aussi utilisé pour d'autres zones climatiques si elles subissent des dégradations irréversibles menant à l'impossibilité pour les sols de retrouver leur usage d'origine.

1.2. La difficile évaluation de l'état et des cinétiques de dégradation ou d'amélioration des sols

Alors qu'il est devenu relativement facile de mesurer et de suivre, à l'échelle mondiale, des paramètres de l'atmosphère comme la température de l'air ou sa teneur en CO₂, ou même de caractériser les sols [EHL 14] et les ravines [HAR 15] sur Mars, aucun

12. Voir chapitre 10 de l'ouvrage *Les sols au cœur de la zone critique : fonctions et services*.

13. Disponible à l'adresse : www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/fr/.

dispositif mondial n'a encore vraiment été mis en place pour déterminer et suivre l'état de dégradation des sols. Une des difficultés provient de la définition même de la dégradation des sols, entachée d'une certaine relativité puisqu'elle se réfère à des biens et services dont l'attente varie selon les populations et les époques. De plus, il est difficile de se fonder sur un état de référence : quel sol n'a-t-il jamais été soumis en effet à aucun agent de dégradation (feux, pluies acides¹⁴, retombées de radionucléides¹⁵ comme le césium 137) ? Par ailleurs, les nombreuses formes de dégradation interdisent tout recours à un indicateur unique et universel de dégradation qu'il suffirait de mesurer et de suivre périodiquement comme c'est le cas, par exemple, pour la teneur du CO₂ dans l'atmosphère. Peut-on se contenter de ne prendre en compte que les surfaces imperméabilisées par des constructions et des infrastructures et, dès lors, ne se fonder que sur l'étalement urbain¹⁶, ou les surfaces tellement érodées¹⁷ qu'aucune production agricole, pastorale ou forestière n'est plus possible, ou sur les seules surfaces abandonnées par l'agriculture [FIE 08] ?

À cette approche essentiellement spatiale, souvent liée à l'évaluation des surfaces considérées comme « cultivables », s'ajoute une approche plus qualitative sur les propriétés, ou « qualité » du sol en termes de perméabilité (chapitre 2 de ce volume), de fertilité biologique et chimique (chapitre 9), de pH (chapitre 4), de teneur en sels (chapitre 5), de contaminants biologiques et chimiques (chapitres 6 et 7).

1.2.1. Évaluation mondiale

En dépit de ces difficultés, trois types d'approche ont été adoptés pour évaluer le degré et l'extension de la dégradation des sols à l'échelle planétaire.

1.2.1.1. À dire d'experts

La première tentative, coordonnée par le PNUE (Programme des Nations unies pour l'environnement ; *Global Assessment of Soil Degradation* – GLASOD [OLD 90]), s'est fondée sur l'avis d'experts de l'ensemble des pays. Cette approche présente l'avantage de la connaissance du terrain – ce qui manque trop souvent aux approches par télédétection spatiale et par modélisation. Au reste, ce sont les données issues de cet effort international qui continuent à faire référence, faute d'un exercice plus récent du même type. Toutefois, une telle approche n'est pas exempte de défauts. Elle a buté en effet sur la question de l'uniformisation des critères et l'homogénéisation des

14. Voir chapitre 4.

15. Voir chapitre 3.

16. Voir chapitre 8.

17. Voir chapitre 3.

évaluations. L'autre difficulté provient d'objectifs non-dits de certains États qui ont déclaré leurs sols entièrement dégradés, probablement dans l'espoir de voir accrue une meilleure part de l'aide internationale, alors qu'à l'évidence certains de leurs sols sous forêts demeurent non ou peu dégradés, particulièrement dans les aires protégées.

1.2.1.2. *Par télédétection spatiale*

Une autre approche (*Global Assessment of Land Degradation and Improvement* de la FAO, GLADA, [BAI 08]) a visé plus à apprécier l'état de dégradation des terres que des sols. Elle se fonde en effet sur la productivité primaire, estimée à partir de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), calculé à partir de données satellitaires. Cet indice objectif, quantifié, peut être obtenu régulièrement sur l'ensemble du globe. Toutefois, il s'agit davantage d'une évaluation du couvert végétal que de l'état de dégradation des sols. Si l'absence de couvert favorise effectivement les processus d'érosion, tout couvert végétal n'a pas la même aptitude en termes de conservation des sols, certaines plantations d'arbres pouvant même être associées à des érosions fortes (voir chapitre 3).

1.2.1.3. *Par modélisation*

Combinant ces données de télédétection spatiale à des bases de données et différents modèles, la FAO a suivi une approche encore plus large (*Global Land Degradation Information System – GLADIS*) [NAC 10], combinant végétation, sols, eau et pressions humaines. Elle a ainsi dressé plusieurs cartes de l'état de dégradation des sols et des tendances. En dépit de leur indéniable intérêt, ces cartes cumulent plusieurs défauts inhérents à la qualité inégale des données, aux modèles utilisés et à l'absence de confrontation à la réalité du terrain. Il s'agit davantage de cartes de risques que de dégradation effective.

1.2.1.4. *Des incertitudes encore trop grandes*

Selon l'approche adoptée, les surfaces mondiales de terres dégradées varient ainsi de 1 à plus de 6 milliards d'hectares [GIB 15], soit une différence de plus de 50 millions de km². Il en découle un risque important de surestimation de terres disponibles, notamment pour des usages agricoles non alimentaires (agrocarburants, chimie verte). De plus, ces approches ne s'accordent pas toutes sur la distribution géographique des terres dégradées, ce qui pose la question de la localisation des efforts prioritaires à fournir en termes de protection ou de réhabilitation des sols.

1.2.2. *Formes de dégradation*

Parmi les dix grands types de dégradation des sols, il est classique de distinguer ceux de nature biologique, physique et chimique, classification un peu trop

académique puisque ces dégradations sont liées, l'une (par exemple réduction des teneurs en matière organique) entraînant souvent les autres (encroûtement superficiel, érosion, compaction, appauvrissement en éléments nutritifs) :

- réduction de la biodiversité des sols. Plusieurs chapitres de ce volume (notamment le chapitre 7) et l'ouvrage *Les sols au cœur de la zone critique : écologie* abordent cette question cruciale pour les services écosystémiques ;

- réduction des teneurs en matières organiques. De même, la plupart des chapitres de ce volume évoquent cette question ; la teneur en carbone organique détermine en effet, pour une bonne part, les principales fonctions des sols. De plus, la matière organique, par exemple, est l'un des constituants, avec les argiles, susceptible de s'éroder le plus facilement ;

- imperméabilisation du sol par encroûtement superficiel (chapitre 2) ou par urbanisation (chapitre 8) qui consommerait environ 20 millions d'hectares de sols agricoles par an dans le monde [FAO 15] ;

- érosion (chapitre 3) qui serait responsable de la perte de plus de 3 tonnes de sols par habitant et par an [FAO 15] ;

- compaction. Le piétinement par les hommes ou le bétail [HIE 99], et le passage d'engins lourds sur des sols humides (champs, pâturages ou forêts) entraînent en conditions humides une réduction de la porosité structurale¹⁸ (interagrégats), avec de nombreuses conséquences [NAW 13] comme la réduction de l'infiltrabilité (chapitre 2). Celle-ci augmente le risque de ruissellement. De plus, la formation d'ornières peut canaliser le ruissellement et favoriser ainsi l'apparition de rigoles et de ravines (chapitre 3). En augmentant la résistance à la pénétration du sol, la compaction réduit les possibilités de levée des semences et d'enracinement. La diminution des possibilités d'alimentation en oxygène, en eau et en nutriments des plantes provoque des réductions de croissance des plantes et des rendements. La compaction a également des effets négatifs sur les activités microbiennes et enzymatiques, ainsi que sur la biodiversité des sols. En favorisant des conditions anoxiques (anaérobie), la compaction augmente les risques d'émission de méthane. De plus, l'apport d'engrais azotés en conditions humides et de tassement des sols entraîne une augmentation de l'émission de protoxyde d'azote (N₂O). Or, méthane et protoxyde d'azote sont des gaz à effet de serre bien supérieurs à ceux du CO₂ : le potentiel de réchauffement global (PRG) du protoxyde d'azote est 298 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone, celui du méthane 25 fois. La compaction se mesure par l'augmentation de la densité apparente (un horizon compacté a une densité apparente plus élevée qu'avant sa

18. Voir Braudeau E., Assi A.T., Mohtar R.H., *Pédologie hydrostructurale*, p. 188, ISTE Editions, Londres, 2016 ; Braudeau E., Assi A.T., Mohtar R.H., *Hydrostructural Pedology*, ISTE, Londres, John Wiley, New York, 2016.

compaction) et la résistance à la pénétration par des pénétromètres. En vue d'une étude plus fine des causes et des effets du travail du sol, il est utile, voire indispensable, d'effectuer une caractérisation du profil cultural [ROG 04] en ouvrant une fosse perpendiculaire à la direction du travail du sol. Il convient alors de délimiter des volumes selon leur densité apparente, leur résistance à la pénétration, l'enracinement, en les reliant aux différentes opérations culturales (profondeur et si possible dates et états hydriques). Une attention particulière doit être portée aux discontinuités de l'enracinement en fonction de la présence d'une semelle de labour. Environ 4 % des sols émergés seraient compactés [FAO 15], soit 68 millions d'hectares, dont près de la moitié (33 millions d'hectares) en Europe. Le surpâturage, et donc la charge en bétail, serait responsable d'un sixième (16 %) de la compaction des sols mondiaux. Pour limiter la compaction, il est nécessaire d'éviter l'utilisation d'engins sur des sols humides. Les sols riches en matière organique résistent mieux à la compaction. Il reste que les sols forestiers, pourtant riches en matière organique, peuvent subir également une dégradation par compaction sous la pression des engins lourds utilisés pour le débardage. Les sols très compactés peuvent voir leur porosité et leur possibilité d'enracinement s'améliorer par le sous-solage, notamment localisé [HAR 08]. Certaines plantes (par exemple le *Stylosanthes hamata*) tendent également à améliorer les conditions physiques des sols [LES 04] ;

– engorgement. Comme la compaction, le remplacement de l'air par l'eau dans la porosité du sol entraîne de nombreuses conséquences biologiques. La plupart des organismes terrestres ne supportent pas, en effet, le manque d'oxygène [PAR 08]. L'excès d'eau provoque aussi des dégradations physiques (comme l'effondrement de la structure) et chimiques (émission de protoxyde d'azote – N_2O) [FAO 15]. L'hydromorphie des sols peut avoir des causes anthropiques directes comme l'absence de drainage dans des systèmes d'irrigation, des sites industriels ou urbains et lors de constructions de barrages ou de retenues collinaires. Au cours de l'évaluation GLASOD, l'engorgement dû à l'irrigation sans drainage suffisant aurait été sous-estimé de moitié dans les plaines indo-gangétiques et au Pakistan. En réduisant le pompage dans les nappes par les racines profondes et l'évapotranspiration, la déforestation des parties hautes des versants tend également à relever le niveau des nappes et ainsi à engorger les sols des parties basses [HAM 12]. Bien qu'elle soit responsable d'émissions de gaz à effet de serre (NH_4 , N_2O), l'hydromorphie volontaire des rizières inondées n'est pas considérée comme une forme de dégradation des sols. Citons aussi des causes anthropiques indirectes de l'engorgement comme celles liées au réchauffement de l'atmosphère. La montée du niveau de la mer élève le niveau de base hydrologique, si bien que l'hydromorphie gagne du terrain sur des surfaces considérables. La fonte des glaciers et du permafrost favorise également l'engorgement des sols, notamment au Canada et en Sibérie. Au demeurant, c'est en Russie que les sols engorgés couvrent les superficies les plus vastes avec 360 millions d'hectares, soit 21 % de la surface totale et 10 % des terres cultivées. Dans les zones côtières, ces processus sont nettement amplifiés

par la subsidence des deltas (Bangladesh, Thaïlande, Viêt Nam...), consécutive à l'excès de pompage dans les nappes, et au moindre apport de sédiments du fait de la multiplication des barrages en amont (voir chapitre 3). Le delta du fleuve Chao Phraya qui arrose Bangkok s'enfoncerait ainsi de 5 à 15 cm par an [SYV 09], celui du Niger de 2,5 à 12,5 cm par an. Dans ce dernier cas, c'est l'extraction du pétrole qui est le principal responsable de la subsidence. Or, il est fréquent que les problèmes d'engorgement s'accompagnent de problèmes de salinisation et de sodisation des sols (chapitre 5). Ces trois processus seraient responsables d'une perte de 30 à 35 % de la productivité des sols concernés [FAO 15] ;

- appauvrissement en éléments nutritifs. En l'absence de périodes assez longues de jachère, ou de restitutions suffisantes sous forme d'engrais organiques (chapitre 9) d'origine agricole ou industrielle pour compenser l'exportation par les récoltes et l'érosion (chapitre 3), le sol s'appauvrit en éléments nutritifs. Ce processus est surtout sensible pour le phosphore en Afrique et en Asie du Sud-Est [QUI 10]. En Afrique, seuls trois pays présentent un bilan nul ou positif [FAO 15] ;

- acidification (chapitre 4) qui entraîne une réduction des rendements, particulièrement en Australie, en Asie du Sud-Est, et dans les régions subsahariennes [FAO 15] ;

- salinisation (chapitre 5) souvent liée à une irrigation sans drainage dans les pays arides et semi-arides (voir engorgement) ; 20 % des sols irrigués, soit 62 millions d'hectares seraient déjà affectés [QAD 14] ;

- pollutions métalliques (chapitre 6) et organiques (chapitre 7) avec ses conséquences sur la biodiversité et la santé humaine (et animale).

1.2.3. Principaux facteurs de la dégradation des sols

Les différents chapitres de ce volume présentent les facteurs anthropiques de la dégradation des sols qui, pour une bonne part, se trouvent liés à l'extension des surfaces cultivées et à l'intensification de l'agriculture. L'extension est particulièrement sensible en Afrique, où la courbe suit celle de la population. L'intensification s'est traduite par un recours massif aux engrais de synthèse et aux pesticides, à une séparation géographique entre régions céréalières et régions d'élevage, à une augmentation de la taille des parcelles, à la suppression des haies, à l'utilisation d'engins agricoles ou forestiers de plus en plus lourds, à une forte extension des surfaces irriguées...

Cette pression sur les terres agricoles se trouve accrue, particulièrement après la crise alimentaire de 2008, par le processus d'accaparement des terres¹⁹ qui peut être

19. Voir chapitre 2 de l'ouvrage *Les sols au cœur de la zone critique : enjeux de société*.

défini comme l'acquisition (location à long terme, souvent de 30-99 ans, concession, achat...) par des fonds privés ou d'État (« fonds souverains » de vastes zones cultivables supérieures à 10 000 ha, dans un pays étranger – le plus souvent en Afrique) pour produire des denrées alimentaires, mais plus fréquemment des agrocarburants. Or, la compétition pour une même denrée (par exemple le maïs) entre un usage alimentaire et énergétique (agrocarburants « de première génération ») pèse sur les cours mondiaux de ces denrées, et les rend moins accessibles aux plus pauvres. Il est bien établi que la forte augmentation, liée à des incitations financières, de l'utilisation du maïs des États-Unis pour la production d'éthanol est à l'origine de la crise alimentaire démarrée en 2007 et des émeutes de la faim dans plusieurs pays en 2008. Cela a donné lieu à la controverse « aliment contre carburant » (en anglais « food versus fuel »). À cette question importante, s'ajoute celle de l'intérêt même des agrocarburants en termes de réduction de gaz à effet de serre [EEA 11, SEA 08]. En effet, l'analyse complète de leur cycle de vie, notamment les émissions de protoxyde d'azote et la prise en compte des changements induits d'usage (par exemple le remplacement d'une forêt primaire en Indonésie par une plantation de palmier à huile), tend à montrer que le bilan en termes d'émissions de gaz à effet de serre est le plus souvent négatif (maïs pour l'éthanol aux États-Unis, huile de palme en Indonésie). La situation la plus favorable serait celle de la production d'éthanol à partir de canne à sucre au Brésil.

Aux productions agricoles, pastorales et forestières (nourriture, fibres, bois, latex, etc.), s'ajoutent non seulement celles des agrocarburants (éthanol et huiles) mais aussi, de plus en plus, celles d'autres molécules biosourcées pour les industries chimiques (par exemple biopolymères) et pharmaceutiques.

Il ne s'agit pas toutefois des seules pressions sur les sols puisqu'ils font également l'objet de destructions et de menaces du fait de l'exploitation des gisements miniers, de l'étalement urbain (chapitre 8) et de la montée du niveau de la mer. Celle-ci peut avoir des effets non seulement sur l'érosion côtière, l'engorgement des sols, mais aussi sur la salinisation de vastes zones par intrusion saline des nappes.

1.2.4. Quelle tendance : spirale de dégradation ou courbe en U ?

D'après les dernières données publiées par la FAO [FAO 15], la situation des sols ne s'améliorerait que sur 10 % de la surface terrestre. En revanche, 25 % subiraient toujours une dégradation très forte, 8 % une dégradation modérée, et seulement 26 % une dégradation faible ou nulle. Le reste se partagerait entre 18 % de sols nus et 2 % de surfaces aquatiques. Si l'on ne considère que les 22 % des terres émergées qui présentent un potentiel agricole, 60 % seraient déjà touchés par différentes formes de dégradation des sols. La tendance générale actuelle serait donc négative. De nombreux travaux, au

moins locaux ou nationaux, montrent que la situation se serait particulièrement aggravée depuis la motorisation et l'intensification de l'agriculture.

Ce tableau assez sombre est conforme aux prévisions pessimistes de Thomas Malthus (1766-1834) qui, en 1799, dans *An Essay on the Principle of Population, as it Affects the Future Improvement of Society with Remarks on the Speculations of Mr. Godwin, M. Condorcet, and Other Writers* répondait notamment à l'optimiste *Esquisse d'un tableau historique des progrès de l'esprit humain* paru en 1795 peu après la mort de son auteur, Nicolas de Condorcet (1743-1794). Cette vision pessimiste du devenir des ressources naturelles de notre planète, et donc des sols, a été actualisée à maintes reprises²⁰. Selon ce courant de pensée, le développement technologique obéit à la loi des rendements décroissants : les innovations sont de plus en plus difficiles et coûteuses pour des gains de plus en plus faibles. Dès lors, l'humanité se rapprocherait du moment où les ressources non renouvelables (comme les sols à l'échelle humaine, voir chapitre 3) seront épuisées. Dès lors qu'il n'existe pas de régulation des biens communs, ceux-ci seraient voués à la dégradation. C'est la « tragédie des biens communs » [HAR 68]. Le processus de dégradation des ressources naturelles correspondrait à une spirale décroissante [SCH 00] : les usagers (agriculteurs, pasteurs, etc.) s'appauvriraient au fur et à mesure que les ressources qu'ils exploitent diminueraient, ce qui les obligerait à aggraver encore la dégradation des ressources²¹ (figure 1.1). Pour les ressources naturelles mondiales, certaines limites auraient déjà été dépassées, notamment en termes de biodiversité, de cycles de l'azote et du phosphore [ROC 09].

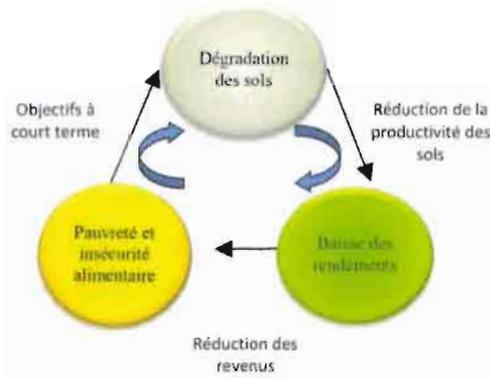


Figure 1.1. Spirale théorique de dégradation des sols

20. Paul Ehrlich, *The Population Bomb*, Ballantine Books, New York, 1968 ; Donella Meadows, Dennis Meadows, Jørgen Randers et William W. Behrens III, *Halte à la croissance ?*, Meadows du Club de Rome, rapport, 1972.

21. Nous verrons au chapitre 3 que cette relation pauvreté-dégradation n'est pas universelle.

À cette vision pessimiste, continue de s'opposer un point de vue plus optimiste, d'abord défendu par Condorcet (voir paragraphe précédent), fondé sur le principe que les communautés confrontées à des ressources en diminution innoveraient et adoptent des pratiques plus productives par unité de surface et de main d'œuvre (voir chapitre 3). De nombreux exemples archéologiques viennent toutefois battre en brèche cette hypothèse puisque de nombreuses communautés se sont effondrées du fait de la dégradation de leurs ressources [DIA 05]. Il n'en demeure pas moins que ce courant de pensée considère que les progrès technologiques, OGM, capteurs et objets connectés, production agricole hors-sol²² doivent permettre une réduction de la pression sur les terres cultivées et favoriser ainsi un meilleur état des sols. Cette vision s'appuie notamment sur la théorie de la croissance de Simon Kuznets (1901-1985), prix Nobel d'économie en 1971, et sa courbe en U inversé. Celle-ci décrit la relation entre le niveau de développement d'un pays (mesuré en PIB/hab.) (en abscisse) et son niveau d'inégalité (en ordonnée). Lors d'une première phase, ce niveau d'inégalité augmenterait avant de se réduire, une fois atteint un seuil de développement. Dans cette courbe, le niveau d'inégalité peut être remplacé par d'autres variables, comme la densité de population ou le pourcentage de surfaces déforestées. Cette courbe en U inversé présenterait une analogie avec les courbes des transitions démographiques et des transitions forestières, avec l'hypothèse que la dégradation de l'environnement [ALM 15, PAN 16] pourrait suivre une telle évolution (figure 1.2), même si elle reste différenciée selon le stade de développement économique des États.

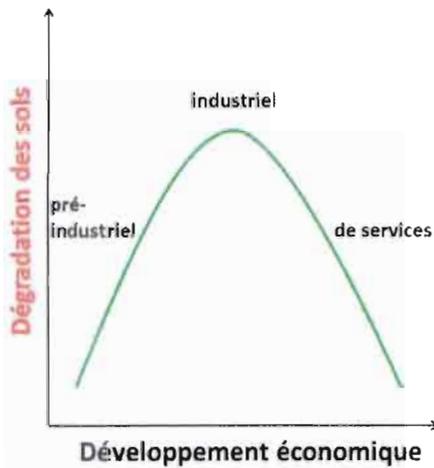


Figure 1.2. La courbe en U inversé de Kuznets appliquée de manière optimiste à l'environnement (adaptée de [PAN 16])

22. Voir dernier chapitre de l'ouvrage *Les sols au cœur de la zone critique : fonctions et services*.

1.2.5. La nécessité de dispositifs de suivi

Entre ces deux visions « pessimiste » et « optimiste », il reste assez difficile de trancher puisque les deux s'appuient sur des hypothèses recevables. Toutefois, elles ne reposent ni sur les mêmes variables (et rarement sur des données concernant les sols), ni sur les mêmes échelles de temps (court, moyen et long termes) et d'espace (échelle des États, ou échelle globale). Il manque indéniablement un dispositif mondial de suivi de l'état des sols, fondé sur un échantillonnage à pas de temps régulier et des mesures standardisées. De tels dispositifs ont été mis en place au Royaume-Uni avec des campagnes d'échantillonnage en 1978, 1998 et 2007 (591 points d'échantillonnage [EMM 10]). En France, un réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) a été lancé en 2000 avec un échantillonnage systématique (incluant donc aussi les villes) selon une maille carrée de 16 km de côté, et 2 240 points d'échantillonnage [SAB 14]. La deuxième campagne a débuté en 2016²³. Un dispositif analogue, mais probablement moins dense, est indispensable au niveau mondial. Il n'a pas reçu jusqu'ici le soutien international nécessaire, alors même que plus des deux tiers des sols terrestres ne sont toujours pas cartographiés à une échelle plus fine que 1/1 000 000 [HAR 08], échelle pourtant nécessaire à des travaux de caractérisation et de suivi de l'état des sols.

1.3. Conservation, restauration, réhabilitation et compensation

Cet ouvrage s'intitule *Les sols au cœur de la zone critique : dégradation et réhabilitation* pour souligner les deux tendances opposées que peut subir l'état d'un sol, tout en maintenant un titre assez court. Comme l'indique le paragraphe suivant, il existe en fait, face à la dégradation des sols, d'autres possibilités d'intervention que la réhabilitation (figure 1.3).

1.3.1. Définitions

La conservation des sols implique le recours à des pratiques qui maintiennent en état les sols en prévenant la dégradation, d'où le terme aussi utilisé de prévention.

La restauration des sols vise à rétablir leur état initial dans toutes ses composantes et fonctions. Elle n'est généralement possible que lors de ses premières phases de dégradation.

L'atténuation cherche à ralentir la dégradation en cours, et si possible à inverser la tendance, en améliorant les fonctions des sols déjà dégradés. Le terme de remédiation est également utilisé.

23. Voir chapitre 2 de l'ouvrage *Les sols au cœur de la zone critique : fonctions et services*.

La réhabilitation concerne les sols déjà très dégradés. Elle vise à inverser la tendance mais n'a pas l'ambition de permettre le retour à l'état initial. Elle demande des investissements souvent plus onéreux que la restauration et l'atténuation.

La compensation peut être envisagée, en dernier recours, lors de la perte inéluctable d'un sol productif, sous l'effet de l'étalement urbain ou de la construction d'une infrastructure (aéroport, autoroute, barrages, etc.) en offrant à son utilisateur un sol équivalent²⁴. Toutefois, si le principe de compensation écologique est déjà difficile à mettre en œuvre, il l'est encore bien plus pour les sols, ceux-ci, à la différence de la faune et même de la flore, n'étant pas transportables.

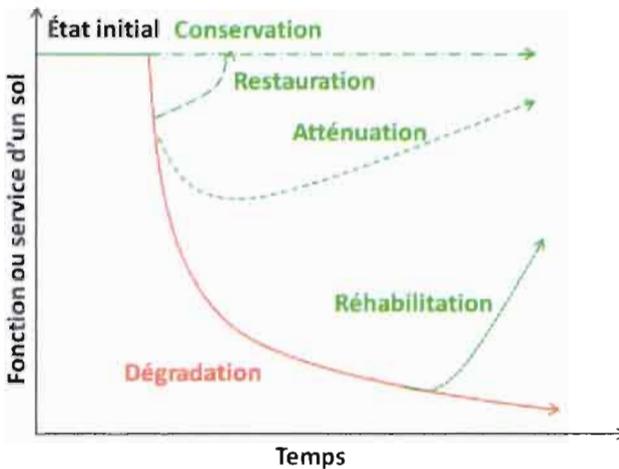


Figure 1.3. Interventions possibles face à la dégradation des sols

1.3.2. Mise en œuvre

Les pratiques de conservation, restauration, atténuation et réhabilitation dépendent des formes de dégradation ; elles sont présentées dans les différents chapitres du présent ouvrage.

Le « World Overview of Conservation Approaches and Technologies (WOCAT) »²⁵ recense les principales techniques de conservation et d'amélioration des sols, adaptées aux différents milieux et situations socio-économiques.

24. Voir chapitre 6 de l'ouvrage *Les sols au cœur de la zone critique : enjeux de société*.

25. Disponible à l'adresse : www.wocat.net.

1.3.3. Concept de neutralité en termes de dégradation des terres²⁶

La convention des Nations unies sur la lutte contre la désertification (CNULCD) souligne que le coût annuel de la dégradation des terres (490 milliards USD) dépasse de loin celui consacré à leur conservation. Elle promeut le concept de « neutralité en termes de dégradation des terres » sous la forme d'un « taux net nul de dégradation des terres », objectif qui pourrait être atteint en :

- gérant les terres de façon plus durable, ce qui réduirait l'intensité de dégradation (conservation, restauration atténuation) ;
- augmentant le pourcentage de réhabilitation des terres dégradées, en sorte que le bilan dégradation *versus* réhabilitation devienne nul.

Ce mot d'ordre international a le mérite d'attirer l'attention des pouvoirs publics des différents États sur la dégradation de leurs sols, et sur la nécessité d'inverser la tendance actuelle à la dégradation. Il se fonde sur le principe qu'une part de la dégradation est inéluctable, ne serait-ce que celle liée à l'étalement urbain, mais qu'elle doit être compensée par la réhabilitation de sols déjà dégradés. Ce principe est inscrit dans les objectifs de développement durable des Nations unies²⁷ pour 2030 et fait l'objet d'un fonds spécial (LDN, *Land Degradation Neutrality*). C'est dans ce cadre qu'une cartographie de référence de la dégradation des terres doit être réalisée dans chaque pays, en prenant en compte la couverture des terres, les changements d'occupation de sol, l'évolution de la productivité des sols et la teneur en carbone organique du sol.

Ce concept de « neutralité » pose problème puisqu'il entérine le niveau actuel de dégradation des sols qui, nous l'avons vu plus haut, est déjà très élevé. Au mieux, l'objectif est de maintenir ce niveau de dégradation. Il reste qu'il constitue un premier pas, en imposant une compensation à la dégradation des sols qui, à l'heure actuelle, n'est toujours pas régulée. Au demeurant, cet objectif à moyen terme est probablement plus réaliste que l'ambition de stopper toute forme de dégradation anthropique des sols. Il n'en constitue pas moins un véritable défi, tant sont nombreux les obstacles scientifiques. Par exemple, les variables prises en compte ne permettent de suivre qu'une fraction des formes de dégradation. Notamment aucun dispositif n'est prévu pour suivre l'érosion, l'acidification et la salinisation des sols. Comme le souligne le chapitre 3, un couvert d'arbres n'est pas garant par exemple de l'absence d'érosion. De plus, les chapitres 6 et 7 montrent que la productivité des

26. Disponible à l'adresse : www.unccd.int/Lists/SiteDocumentLibrary/Publications/Land-DegradationNeutrality_%20FR_web.pdf.

27. Disponible à l'adresse : www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/.

sols (un des critères retenus) peut être associée à de graves problèmes de pollution. Le concept de neutralité en termes de dégradation des terres pose également de nombreuses questions politiques [GRA 15] – comment résoudre les nombreux conflits d'usage liés aux sols ; économiques – les moyens seront-ils suffisants pour assurer une réhabilitation des sols dégradés à grande échelle ? et juridiques²⁸ – comment faire évoluer les droits de propriété vers des droits d'usage ?

À certains égards, le débat sur la neutralité en termes de dégradation des terres s'apparente à celui opposant les concepts de *land sharing* (le partage des terres, avec une agriculture extensive et des espaces naturels) et de *land sparing* (« l'économie de terres », avec une agriculture intensive peu respectueuse de l'environnement et des espaces naturels plus étendus) [FIS 14]. Le concept de neutralité présente aussi certaines analogies avec le marché des droits à polluer et le marché du carbone.

1.4. Conclusions

La dégradation des sols constitue un enjeu majeur pour la durabilité des fonctions et services fournis par la zone critique. Or, l'état des sols demeure très mal caractérisé au niveau mondial du fait de l'absence d'un niveau de référence fiable et d'un dispositif de suivi d'indicateurs pertinents pour les sols.

Il est toutefois bien établi que les sols ont déjà subi une dégradation importante, avec une forte accélération liée à la déforestation dans les régions tropicales et l'intensification de l'agriculture (motorisation lourde, engrais azotés de synthèse, irrigation sans drainage). À ces causes bien identifiées s'ajoutent celles liées à l'étalement urbain, à la subsidence des deltas, au changement climatique (fonte du permafrost, montée du niveau de la mer), et aux changements d'usage des terres à des fins non alimentaires (dont les agrocarburants).

Il est impératif que la courbe de dégradation s'inverse pour que les sols continuent à produire les fonctions et services qu'une population mondiale en forte augmentation exige d'eux. Si la communauté internationale commence à en prendre conscience (par exemple fonds international LDN – *Land Degradation Neutrality*), de nombreuses incertitudes demeurent quant aux moyens mobilisés pour la réhabilitation des sols dégradés et sur la mise en œuvre d'un système de suivi mondial de l'état des sols et de ses différentes formes de dégradation. Cet instrument est indispensable pour déterminer les priorités, en fonction des besoins des populations, et pour fournir régulièrement des données fiables sur l'état mondial des sols.

28. Voir l'ouvrage *Les sols au cœur de la zone critique : enjeux de société*.

QUESTIONS DE RECHERCHE

1. Quels sont les indicateurs les plus pertinents et utilisables à différentes échelles de temps et d'espace pour définir l'état d'un sol ?²⁹
2. Quelles sont les vitesses de changement d'état des sols (dégradation/réhabilitation) pour les différentes formes de dégradation et d'intervention (restauration, atténuation, réhabilitation) et quels sont les niveaux susceptibles d'être obtenus (figure 1.3) ?
3. Quelles sont les interactions entre dégradation/réhabilitation des sols, densité de population et stade de développement économique des régions ou pays considérés ?

RECOMMANDATIONS

1. Rester prudent sur les évaluations mondiales des différentes formes de dégradation des sols du fait des fortes incertitudes liées à la disparité de la qualité des données et aux méthodes utilisées (dire d'experts, télédétection, modélisation).
2. Se fonder sur des expérimentations et des données de suivi à long terme pour établir des tendances fiables dans des contextes donnés, sans tenter de les extrapoler à d'autres situations.
3. Formuler des recommandations réalistes tenant compte des objectifs et contraintes des différents acteurs, pour enrayer la dégradation des sols et inverser la tendance.

1.5. Bibliographie

- [ALM 15] AL-MULALI U., WENG-WAI C., SHEAU-TING L., *et al.*, « Investigating the environmental Kuznets curve (EKC) hypothesis by utilizing the ecological footprint as an indicator of environmental degradation », *Ecological Indicators*, n° 48, p. 315-323, 2015.
- [BAI 08] BAI Z.G., DENT D.L., OLSSON L., *et al.*, « Proxy global assessment of land degradation », *Soil Use and Management*, vol. 24, n° 3, 2008.
- [BER 06] BERTHELIN J., BABEL U., TOUTAIN F., « History of soil biology », dans B. WARKENTIN (DIR.), *Foot Prints in the Soil-People and Ideas in Soil History*, p. 279-306, Elsevier, Amsterdam, 2006.
- [DIA 05] DIAMOND J., *Collapse : How societies choose to fail or succeed*, Penguin, Londres, 2005.

29. En dépit de très nombreux travaux, la question n'est toujours pas résolue.

- [EEA 11] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY SCIENTIFIC COMMITTEE, Opinion of the EEA Scientific Committee on Greenhouse Gas Accounting in Relation to Bioenergy, Avis européen, 15 septembre, 2011.
- [EHL 14] EHLMANN B.L., EDWARDS C.S., « Mineralogy of the Martian surface », *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, n° 42, p. 291-315, 2014.
- [EMM 10] EMMETT B.A., *et al.*, Countryside survey : soils report from 2007, rapport, NERC Environmental Information Data Centre, 2010.
- [FAO 15] FAO, Status of the World's Soil Resources, rapport principal, Rome, disponible à l'adresse : <http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf>, 2015.
- [FIE 08] FIELD C.B., CAMPBELL J.E., LOBELL D.B., « Biomass energy : the scale of the potential resource », *Trends in ecology & evolution*, vol. 23, n° 2, p. 65-72, 2008.
- [FIS 14] FISCHER J., ABSON D.J., BUTSIC V., *et al.* « Land sparing versus land sharing : moving forward », *Conservation Letters*, vol. 7, n° 3, p. 149-157, 2014.
- [GIB 15] GIBBS H.K., SALMON J.M., « Mapping the world's degraded lands », *Applied geography*, n° 57, p. 12-21, 2015.
- [GRA 15] GRAINGER A., « Is Land Degradation Neutrality feasible in dry areas ? », *Journal of Arid Environments*, n° 112, p. 14-24, 2015.
- [HAM 12] HAMMECKER C., MAEGHT J.L., GRÜNBERGER O., *et al.*, « Quantification and modelling of water flow in rain-fed paddy fields in NE Thailand : evidence of soil salinization under submerged conditions by artesian groundwater », *Journal of hydrology*, n° 456, p. 68-78, 2012.
- [HAR 08] HARTMANN C., POSS R., NOBLE A.D., *et al.*, « Subsoil improvement in a tropical coarse textured soil : effect of deep-ripping and slotting », *Soil and Tillage Research*, vol. 99, n° 2, p. 245-253, 2008.
- [HAR 15] HARRISON T.N., OSINSKI G.R., TORNABENE L.L., *et al.*, « Global documentation of gullies with the Mars Reconnaissance Orbiter Context Camera and implications for their formation », *Icarus*, n° 252, p. 236-254, 2015.
- [HAR 68] HARDIN G., « The Tragedy of the Commons », *Science*, vol. 162, n° 3859, p. 1243-1248, 1968.
- [HAR 08] HARTEMINK A.E., « Soil map density and nation's wealth and income », dans A.E. HARTEMINK, *et al.* (DIR.), *Digital soil mapping with limited data*, p. 53-66, Springer, Dordrecht, 2008.
- [HIE 99] HIERNAUX P., BIELDERS C.L., VALENTIN C., *et al.*, « Effects of livestock grazing on physical and chemical properties of sandy soils in Sahelian rangelands », *Journal of Arid Environments*, vol. 41, n° 3, p. 231-245, 1999.

- [LES 04] LESTURGEZ G., POSS R., HARTMANN C., *et al.*, « Roots of *Stylosanthes hamata* create macropores in the compact layer of a sandy soil », *Plant and Soil*, vol. 260, n° 1-2, p. 101-109, 2004.
- [LIN 10] LIN H., « Earth's Critical Zone and hydrogeology: concepts, characteristics and advances », *Hydrology Earth System Sciences*, n° 14, p. 25-45, 2010.
- [MAN 17] MANIVANH L., PIERRET A., RATTANAVONG S., *et al.*, « *Burkholderia pseudomallei* in a lowland rice paddy: seasonal changes and influence of soil depth and physico-chemical properties », *Scientific reports*, n° 7, 2017.
- [NAC 10] NACHTERGAELE F., PETRI M., BIANCALANI R., *et al.*, Global land degradation information system (GLADIS). Beta version. An information database for land degradation assessment at global level. Land degradation assessment in drylands technical report, rapport n° 17, FAO, Rome, 2010.
- [NAW 13] NAWAZ M.F., BOURRIÉ G., TROLARD, F., « Soil compaction impact and modelling. A review », *Agronomy for sustainable development*, vol. 33, n° 2, p. 291-309, 2013.
- [NES 15] NESME J., SIMONET P., « The soil resistome: a critical review on antibiotic resistance origins, ecology and dissemination potential in telluric bacteria », *Environmental microbiology*, vol. 17, n° 4, p. 913-930, 2015.
- [NRC 01] NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC), *Basic research opportunities in earth science*, National Academy Press, Washington DC, 2001.
- [OLD 90] OLDEMAN L.R., HAKKELING R.U., SOMBROEK W.G., World map of the status of human-induced soil degradation (GLASOD), United Nations Environment Program and International Soil Reference and Information Centre (UNEP/ISRIC), Wageningen, 1990.
- [PAN 16] PANAYOTOU T., « Economic growth and the environment », dans N. HAENN, R. WILK (DIR.), *Environment in Anthropology: A Reader in Ecology, Culture, and Sustainable Living*, 2nd édition, p. 140-148, NYU Press, New York, 2016.
- [PAR 08] PARENT C., CAPELLI N., BERGER A., *et al.*, « An overview of plant responses to soil waterlogging », *Plant Stress*, vol. 2, n° 1, p. 20-27, 2008.
- [QAD 14] QADIR M., QUILLÉROU E., NANGIA V., *et al.*, « Economics of salt-induced land degradation and restoration », *Natural Resources Forum*, vol. 38, n° 4, p. 282-295, 2014.
- [QUI 10] QUINTON J.N., GOVERS G., VAN OOST K., *et al.*, « The impact of agricultural soil erosion on biogeochemical cycling », *Nature Geoscience*, vol. 3, n° 5, p. 311-314, 2010.

- [ROC 09] ROCKSTRÖM J., STEFFEN W., NOONE K., *et al.*, « A safe operating space for humanity », *Nature*, vol. 461, n° 7263, p. 472-475, 2009.
- [ROG 04] ROGER-ESTRADE J., RICHARD G., CANEILL J., *et al.*, « Morphological characterisation of soil structure in tilled fields : from a diagnosis method to the modelling of structural changes over time », *Soil and Tillage Research*, vol. 79, n° 1, p. 33-49, 2004.
- [SAB 14] SABY N.P.A., *et al.*, « National soil information and potential for delivering GlobalSoilMap products in France : a review », *GlobalSoilMap : Basis of the global spatial soil information system*, p. 69-72, INRA, Orléans, 2014.
- [SCH 00] SCHERR S.J., « A downward spiral? Research evidence on the relationship between poverty and natural resource degradation », *Food policy*, vol. 25, n° 4, p. 479-498, 2000.
- [SEA 08] SEARCHINGER T., *et al.*, « Use of US croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change », *Science*, vol. 319, n° 5867, p. 1238-1240, 2008.
- [SYV 09] SYVITSKI J.P.M., *et al.*, « Sinking deltas due to human activities », *Nature Geoscience*, vol. 2, n° 10, p. 681, 2009.

Valentin Christian (2018)

Caractérisation de l'état des sols

In : Valentin Christian (ed.). *Les sols au coeur de la zone critique 5 : dégradation et réhabilitation*

Londres : ISTE, p. 17-35. (Système Terre - Environnement : Série Les Sols ; 5)

ISBN 978-1-78405-383-3