

LES PETITS THÉMATIQUES

Les sols, un enjeu de développement

■ POUR LA
SCIENCE

L'information scientifique de référence maintenant sur tablette et smartphone !



Téléchargez gratuitement
l'application sur App Store et Google Play.
Le 1^{er} numéro de *Pour la Science* est offert !



Avec l'application « Pour la Science », retrouvez dès leur sortie le mensuel *Pour la Science* à 5,49 € et son hors-série trimestriel *Dossier Pour la Science* à 5,99 € en version numérique optimisée pour tablette : lecture intuitive, sommaire interactif, contenus enrichis, feuilletage hors connexion, etc.



Flashez ce QR code avec votre mobile ou votre tablette pour télécharger immédiatement l'application.



Découvrez aussi l'application « Cerveau & Psycho » pour retrouver le magazine *Cerveau & Psycho* et son hors-série *L'Essentiel Cerveau & Psycho*

LES PETITS THÉMATIQUES

Les petits thématiques, ce sont des compilations de 5 articles sélectionnés pour vous parmi les articles parus dans Pour la Science ou Cerveau&Psycho, pour faire le point sur un thème précis. Dans ce numéro, retrouvez les articles suivants :

Les sols, un enjeu du développement



Le labour obsolète

par David HUGGINS et John REGANOLD

La pratique ancestrale consistant à retourner la terre avant de nouveaux semis est l'une des causes principales de la dégradation des terres arables. C'est pourquoi de nombreux agriculteurs se tournent aujourd'hui vers des systèmes de culture sans travail du sol.

Christophe SALOMON, directeur de recherche au CNRS, dirige le groupe «Gaz de Fermi ultrafroids» au sein du Laboratoire Kastler-Brossel de l'École normale supérieure, à Paris.

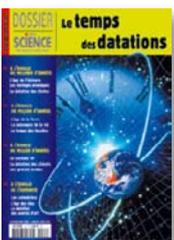


La désertification n'est pas une fatalité

par Pierre ROGNON

Des techniques et des perspectives d'aménagement permettent aux pays d'Afrique du Nord, menacés par la désertification, de préserver leurs sols et de développer leur agriculture. Sont-elles applicables ? Seront-elles appliquées ?

Pierre ROGNON est professeur émérite en sciences de la Terre à l'Université Pierre et Marie Curie de Paris.



Les sols à l'épreuve du temps

par Dominique SCHWARTZ

Dans les sols, le temps s'imprime de façon différente selon les constituants. Il est nécessaire de discerner chacun d'eux pour reconstituer la dynamique et l'histoire des paysages.

Dominique SCHWARTZ est pédologue et biogéographe. Directeur de recherches à l'IRD, il est détaché en tant que professeur de géographie à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg.



Entre terre et mer : des zones à préserver

par Fernand VERGER

Les zones humides du littoral, sols gorgés d'eau, sont parmi les plus riches écosystèmes de la planète. Leur protection est devenue un enjeu majeur pour le maintien de la biodiversité.

Fernand VERGER est professeur émérite à l'École normale supérieure, à Paris, et conseiller scientifique du Conservatoire du littoral.



Comment se forment les sols

par Jean-Paul LEGROS

On croyait que les strates qui constituent les sols apparaissaient par réorganisation interne. Progressivement, il s'est confirmé qu'elles se créent par accumulation de résidus peu solubles issus de l'altération du socle rocheux, tandis que les fractions solubles sont emportées par l'eau.

Jean-Paul LEGROS, ingénieur agronome, a suivi presque toute sa carrière à l'Institut national de la recherche agronomique (INRA) de Montpellier. Il est aujourd'hui président de l'Académie des sciences et lettres de Montpellier.

David Huggins et John Reganold

La pratique ancestrale consistant à retourner la terre avant de nouveaux semis est l'une des causes principales de la dégradation des terres arables. C'est pourquoi de nombreux agriculteurs se tournent aujourd'hui vers des systèmes de culture sans travail du sol.

Le *labour* obsolète

1. LA RÉGION DE PALOUSE,
dans l'État de Washington,
aux États-Unis, est très vallonnée.
Jusque dans les années 1970,
elle subissait une forte érosion.
Les techniques agricoles sans
labour ont freiné ce processus.

Labourage et pâturage sont les deux mamelles dont la France est alimentée et les vraies mines et trésors du Pérou.

Maximilien de Béthune, duc de Sully (1559-1641), *Économies Royales*.

Le 16 juin 1997, des orages diluviens s'abattent sur la région de La Vau-palière, en Seine-Maritime. Rapidement, des torrents de boue se forment et dévastent la commune, faisant trois morts. La rapidité et l'intensité des flots était-elle inéluctable ? Peut-être pas ; en effet, les flancs du bassin-versant, en amont de la commune, sont couverts de grandes exploitations agricoles, labourées année après année. Oubliées les prairies, les forêts et les haies du bocage qui favorisaient l'infiltration d'eau dans le sol et limitaient le ruissellement en y opposant des obstacles. De fait, selon le Cemagref, les sols labourés ne retiennent que 10 à 60 millimètres d'eau alors que les prairies en retiennent de 40 à 100 millimètres, et une forêt de 50 à 300 millimètres. En outre, le labour entraîne le ruissellement de sédiments, d'engrais et de pesticides vers les rivières, les lacs et les océans.

Le labour n'influe pas seulement sur le ruissellement, il rend aussi les sols vulnérables à l'érosion, et il modifie leur structure et leur composition – en les appauvrissant. Pourtant, partout dans le monde, la plupart des agriculteurs labourent leurs champs pour préparer l'ensemencement. La pratique, qui consiste à retourner le sol avant de planter, enterre les résidus des récoltes précédentes, les engrais d'origine animale et les mauvaises herbes.

Le labour est une des premières causes de la dégradation des terres agricoles – l'un des problèmes environnementaux les plus graves – dégradation qui constitue une menace sur la production alimentaire et la subsistance du monde rural, en particulier dans les régions pauvres et densément peuplées des pays en développement. Peut-on se passer du labour ? Oui, grâce à deux techniques : le semis direct et le travail sans labour. La première méthode consiste à laisser les résidus de récolte sur les champs après la moisson, où ils constituent un paillis qui protège le sol de l'érosion et améliore la fertilité du sol. Dans la seconde, un travail superficiel du sol précède le semis (les résidus sont partiellement enfouis). Les agriculteurs utilisent des semoirs spécialement conçus qui pénètrent à travers les rési-

dux végétaux jusqu'au sol non dégradé, où les graines peuvent germer et croître pour la nouvelle récolte.

Cette technique offre de nombreux avantages. Elle est moins coûteuse, elle préserve un bon niveau de matières organiques à la surface du sol, elle limite l'érosion hydrique et elle favorise le stockage de carbone dans le sol. Ainsi, dans l'essai de travail du sol sur une longue durée, en place depuis les années 1970 à la station de Boigneville, dans l'Essonne, l'augmentation de carbone stocké après 28 ans sans labour est de 13 pour cent, soit quelque cinq tonnes par hectare (voir l'encadré page 74).

En France, les techniques sans labour représentent environ 30 pour cent des blés et près de 40 pour cent des colzas, mais la répartition sur le territoire est variable. Par exemple, plus de 50 pour cent des blés semés sans labour le sont dans la région Midi-Pyrénées et moins de cinq pour cent le sont en Bretagne.

Le semis direct s'inscrit dans un nouveau contexte agricole où la production de nourriture pour satisfaire la population mondiale n'est pas suffisante : les agriculteurs doivent également préserver les ressources naturelles. Le semis direct est une méthode qui peut les aider. S'il suppose des défis à relever et des compromis à faire, dans certaines parties du monde les cultivateurs abandonnent peu à peu leurs charrues.

Une mamelle à abandonner

Dès qu'ils ont adopté l'agriculture, il y a environ 10 000 ans, les hommes ont utilisé des méthodes fondées sur le semis direct ou sur le labour (voir l'encadré page 72). En effet, parmi les premiers cultivateurs du Néolithique, certains creusaient des trous dans le sol avec un bâton, y jetaient des graines et les recouvraient avec de la terre. D'autres grattaient le sol avec un bâton pour placer des graines sous la surface.

Aujourd'hui, avec le perfectionnement des charrues et les tracteurs toujours plus puissants, le travail mécanique de la terre s'est imposé : le labour est devenu la norme pour les plantations et pour le contrôle des mauvaises herbes.

Le premier coup de semence eut lieu dans les années 1930, à l'occasion du *Dust Bowl* (le « désert de poussière »). Il s'agit

lète

HISTOIRE DE L'AGRICULTURE : LES PRINCIPALES ÉTAPES

Les méthodes d'agriculture fondées sur le semis direct comme sur le labour sont anciennes, mais c'est finalement la seconde technique qui a dominé, grâce à l'évolution de la charrue. Ces dernières décennies, cependant, les progrès réalisés dans les domaines des herbicides et des machines agricoles ont rendu le semis direct praticable à une échelle commerciale.

– 8000

Le bâton plantoir, la première version du non-labour, permet la plantation de graines sans retourner le sol. La première charrue, dite « grattoir », est un pieu en bois que l'on manœuvre à deux. On sème les graines dans les sillons ainsi creusés.



– 6000

Les animaux de trait, tels les bœufs domestiqués en Mésopotamie remplacent les hommes pour tirer la charrue.

– 3500

Les Égyptiens et les Sumériens inventent le soc de charrue, un outil en bois en forme de coin muni d'une lame en fer qui détache la couche superficielle du sol.



1100

Les Européens utilisent une charrue améliorée, dite à versoir, dotée d'une lame recourbée qui retourne la terre après qu'elle a été fendue, enfouissant les mauvaises herbes et les résidus végétaux.

1837

Le forgeron américain John Deere invente la charrue à versoir en acier, capable de fragmenter les mottes de terre grasse et collante. C'est le point de départ de l'exploitation des prairies du *Middle West* américain.



Début du XX^e siècle

Les tracteurs tirent des charrues munies de nombreux versoirs.



Années 1940-1950

Grâce aux herbicides, tels le 2,4-D (l'acide 2,4 dichlorophénoxyacétique), l'atrazine et la paraquat, les agriculteurs contrôlent les mauvaises herbes avec moins de labour.

Années 1960

Les semoirs « non-labour » creusent des sillons peu profonds, qui perturbent peu le sol et maintiennent en place les résidus des récoltes précédentes.



De haut en bas : Wu Hong/Epa/Corbis, Raif Rojleschek, Andy Anderson, Hugh Tallman/Smithsonian Images, Lane Lambert/StockPhoto

L'ESSENTIEL

✓ **L'agriculture traditionnelle, fondée sur le labour, favorise l'érosion des sols et le ruissellement des eaux.**

✓ **Grâce aux techniques sans labour, avec un travail du sol superficiel ou en semis direct, on limite ces dégradations : l'agriculture devient durable.**

✓ **Les coûts du matériel nécessaire et la difficulté de l'apprentissage constituent des freins à l'abandon généralisé du labour.**

d'un épisode de sécheresse et d'une série de tempêtes de poussière qui dévastèrent la région des grandes plaines aux États-Unis et au Canada.

Ces tempêtes détruisirent les récoltes, emportèrent la couche arable des champs et laissèrent cultures, fermes et matériel dans un état de désolation. Plusieurs millions de personnes furent obligées de migrer, notamment vers la Californie. John Steinbeck décrit cette période dans *Les Raisins de la colère*. Le labour fut incriminé, car il aurait entraîné une érosion très importante.

La crise écologique conduisit à la création du *Soil Conservation Service*, aujourd'hui *Natural Resources Conservation Service*, organisme en charge de la sauvegarde des ressources naturelles et de l'environnement. Face à l'ampleur de la catastrophe, les agriculteurs ont commencé à explo-

rer des méthodes de travail du sol réduit, notamment après la publication controversée, en 1943, de *Plowman's Folly*, par Edward Faulkner, qui remettait en question la nécessité du labour.

Sa proposition devint plus acceptable avec la mise au point des herbicides après la Seconde Guerre mondiale. Finalement, les recherches sur le non-labour commencèrent dans les années 1960. Toutefois, les herbicides ne sont pas indispensables, et les cultivateurs bio ont eux aussi adopté le semis direct (voir l'encadré page ci-contre)

Les vieilles charrues

Compte tenu du rôle central de la charrue dans l'agriculture, la conception d'un moyen de s'en passer ne fut pas aisée, car il fallait réviser tous les aspects de la production agricole. Toutefois, des semoirs

adaptés ont été élaborés pour satisfaire les exigences de l'agriculture sans labour. Ces nouveaux semoirs constituent l'une des principales technologies grâce auxquelles les cultivateurs peuvent pratiquer de façon rentable le semis direct.

Aujourd'hui, en labourant, les agriculteurs perturbent le sol à des degrés divers selon le type de charrue, certaines retournant complètement les 25 premiers centimètres de sol, enterrant la plus grande partie des résidus. Cependant, d'autres outils brisent seulement la couche superficielle, sans la retourner, et préservent plus de résidus en surface. Les techniques de semis direct créent des sillons de deux à huit centimètres de profondeur, où l'on sème: la terre n'est pas retournée et la perturbation du sol est minimale.

La faune en profite

La protection du sol n'est pas le seul avantage du semis direct. Nous avons vu que les résidus végétaux laissés à la surface du sol accroissent parfois l'infiltration de l'eau et limitent le ruissellement. Cet effet entraîne la réduction de la pollution des sources voisines due au transport des sédiments, des engrais et des pesticides qu'ils contiennent. Ces résidus contribuent aussi à la conservation de l'eau en réduisant l'évaporation, un avantage quand la disponibilité en eau limite la production de récoltes.

Les techniques sans labour favorisent également la diversité de la flore et de la faune des sols en apportant aux organismes du sol, tels les vers de terre, de la nourriture provenant des résidus et en stabilisant leur habitat. Associées à l'augmentation de la quantité de matière organique dans le sol, ces conditions aident au développement d'une structure interne des sols plus stable. Ainsi, l'agriculture sans labour permet une culture plus durable, notamment sur les terrains en pente qui sont menacés par l'érosion.

La vie sauvage bénéficie aussi du non-labour, car les résidus de récolte et les grains perdus lors de la moisson fournissent gîte et couvert aux oiseaux et à d'autres espèces animales. En 1986, des chercheurs de l'Iowa ont découvert 12 espèces d'oiseaux nichant dans des champs non labourés, soit trois fois plus que dans les champs labourés.

En outre, la réduction du labour accroît la séquestration du carbone dans le sol. L'une des stratégies de réduction des gaz à effet

de serre est la séquestration du carbone dans le sol, grâce à la photosynthèse des végétaux et à la matière organique (elle contient 58 pour cent de carbone) piégée dans les résidus non moissonnés et les racines.

Enfin, les techniques sans labour offrent des avantages économiques aux agriculteurs. Pour obtenir une récolte, un agriculteur ne parcourt qu'au plus quatre fois son champ contre au moins sept lorsqu'il laboure. Le semis direct se traduit par une économie de 50 à 80 pour cent en carburant et de 30 à 50 pour cent en temps de travail.

Même si le matériel pour les semis en non-labour est parfois coûteux (certains semoirs valent plus de 75 000 euros), les avantages pour les cultivateurs restent importants. Avec ces gains de temps et d'argent, les agriculteurs peuvent être plus compétitifs sur de plus petites exploitations, ou ils peuvent s'agrandir et cultiver plus d'hectares, doublant parfois la

Pour et contre

✓ **Les techniques sans labour réduisent l'érosion du sol, les coûts de carburant et de travail, ainsi que la pollution des lacs et des cours d'eau. Elles améliorent la rétention d'eau, la qualité des sols et la séquestration du carbone.**

✓ **Cependant, l'abandon du labour est difficile, le matériel nécessaire est coûteux, on utilise plus d'herbicides et d'engrais, des maladies apparaissent, et les rendements sont parfois inférieurs.**

Sols sans labour et agriculture biologique

En France, les techniques sans labour (le semis direct sous couvert végétal ou le travail du sol de façon superficielle) sont étudiées depuis plusieurs années en agriculture conventionnelle. Depuis peu, elles le sont aussi en agriculture biologique. Quelles sont les différences ? Le sol n'étant pas retourné, les mauvaises herbes ne sont plus enfouies et peuvent donc devenir envahissantes. Les résidus des cultures se décomposent lentement à la surface, freinent l'activité de minéralisation des micro-organismes du sol et donc l'apport d'éléments minéraux aux cultures. Ces problèmes sont résolus en agriculture conventionnelle par un recours accru aux herbicides et aux engrais azotés, mais ces produits sont interdits en agriculture biologique. En ne retournant plus le sol, les agriculteurs espéraient favoriser la vie biologique et les cycles naturels, mais nombre d'entre eux ont maintenu le labour afin d'éviter l'infestation par les mauvaises herbes, ou adventices. Avec l'évolution des techniques et des matériels, la question est de nouveau d'actualité.

Plusieurs programmes sur les techniques sans labour appliquées en agriculture biologique ont été lancés afin d'étudier leurs effets sur le développement des mauvaises herbes, sur les rendements et sur la fertilité des sols. Ces techniques ont été évaluées selon divers modes de production (maraîchage, grandes cultures...) et conditions pédo-climatiques. Les premiers résultats de ces

travaux ont été présentés au colloque DINA-BIO sur l'agriculture biologique organisé par l'INRA à Montpellier en mai 2008. La principale difficulté liée à l'adoption des techniques sans labour en agriculture biologique reste la maîtrise des mauvaises herbes. Toutefois, après trois ans où des stratégies de désherbage mécanique ont été mises en place, le développement de ces adventices est contrôlé. Le chisel (une sorte de herse qui scarifie le sol sans le retourner) à une profondeur d'environ 15 centimètres associé à un désherbage mécanique donnent de bien meilleurs résultats: le contrôle des mauvaises herbes et les rendements sont semblables à ceux obtenus avec le labour.

En ce qui concerne la fertilité du sol, les résultats des techniques sans labour sont mitigés: les animaux du sol sont plus nombreux, mais l'absence de « fragmentation » augmente le tassement et baisse la porosité dans certains types de sols.

Ainsi, les techniques sans labour peuvent être adoptées par l'agriculture biologique. Toutefois, dans certaines conditions, l'infestation des mauvaises herbes redoutées peut diminuer les rendements. Les études se poursuivent pour confirmer ces résultats et aider les pratiquants de l'agriculture biologique à adapter ces techniques dans leur ferme.

Joséphine Peigné, Jean-François Vian et Yvan Gautronneau
ISARA Lyon

LES AUTEURS



David HUGGINS est pédologue au Département américain de l'agriculture (USDA), à Pullman, aux États-Unis. John REGANOLD est professeur de pédologie à l'Université d'État de Washington, à Pullman.

superficie de leurs terres en utilisant le même matériel et en fournissant la même quantité de travail.

Les techniques sans labour sont adaptées à divers climats, sols et types de culture, à l'exception du riz de rizière et des plantes racines, telles les pommes de terre. Pourtant, en 2004, elles n'étaient pratiquées que sur 94,5 millions d'hectares dans le monde, soit sept pour cent de l'ensemble des terres cultivées (voir la figure 2).

Environ 85 pour cent de ces terres cultivées sans labour sont en Amérique du Nord et en Amérique du Sud. Aux États-

Unis, en 2004, environ 41 pour cent des terres cultivées étaient exploitées par des systèmes d'agriculture de conservation (on garde les résidus de récoltes précédentes, mais on peut travailler le sol) contre 26 pour cent en 1990. La majeure partie de cet accroissement résulte de l'adoption généralisée des techniques de semis direct, qui représentent jusqu'à 22 pour cent des terres cultivées.

Cet engouement résulte sans doute, en partie, des subventions octroyées par le gouvernement et d'autres programmes d'aide aux fermiers renonçant au labour. En Amérique du Sud, les techniques sans labour se sont développées rapidement : c'est le résultat des efforts de formateurs agricoles venus de l'université et ceux de communautés locales d'agriculteurs demandeurs de systèmes de culture sans labour viables, adaptés à leurs besoins.

En revanche, le processus est plus lent en Europe, en Afrique et dans la plupart des régions d'Asie. En France, le non-labour, qui inclut du travail du sol sans le retourner, représente environ 4,6 millions d'hectares (soit 35 pour cent des terres cultivées). Mais le semis direct ne représente que 150 000 hectares.

L'adoption du non labour est notablement difficile dans les pays en développement en Afrique et en Asie, car les agriculteurs de ces pays utilisent souvent les résidus de récoltes comme combustible ou fourrage. De plus, les semoirs spécialisés indispensables au non-labour et les herbicides nécessaires ne sont pas nécessairement disponibles ou abordables. Par ailleurs, en Europe, l'absence de politiques gouvernementales pour promouvoir le non-labour, ainsi que les restrictions sévères imposées sur l'utilisation des pesticides (dont les herbicides), entre autres, font que les agriculteurs ne sont guère incités à adopter cette approche.

L'abandon du labour est souvent associé à l'augmentation du nombre de mauvaises récoltes ou à la diminution des revenus. Cette idée a freiné l'adoption généralisée de cette technique et rend encore hésitants beaucoup d'agriculteurs peu enclins à prendre plus de risques que ceux déjà inhérents aux pratiques traditionnelles. De fait, les agriculteurs qui passent aux techniques sans labour font l'expérience d'un apprentissage assez rude. Outre les exigences de pratiques agricoles différentes, cette conversion a des effets notables sur les sols et les

Les techniques sans labour en France

En France, on distingue trois grands types de travail du sol. Le labour, qui consiste à travailler le sol en le retournant et à enfouir toutes les pailles. Il correspond à environ 66 pour cent des surfaces de grandes cultures en 2006. Le non-labour avec un travail du sol superficiel qui n'enfouit que partiellement les pailles (33 pour cent des surfaces en 2006). Cette technique reste encore souvent une pratique d'opportunité qui alterne avec le labour selon les années. En 2006, seuls 11 pour cent des surfaces de grandes cultures n'ont pas été labou-

dés 1970. Sur cet essai, trois techniques de travail du sol – labour, travail superficiel et semis direct – sont comparées sur des parcelles traitées de la même façon chaque année. Plusieurs cultures sont semées : blé, maïs, orge, betterave sucrière... Quels sont les résultats ?

D'abord, les rendements des cultures, en moyenne sur près de 40 ans, sont identiques quelle que soit la technique. Les économies réalisées sur la main-d'œuvre et sur les charges de mécanisation améliorent le revenu de l'agriculteur qui réduit ou supprime le travail du sol. Par ailleurs, les consommations d'énergie sont réduites de 5 à 10 pour cent, de même que les émissions de gaz à effet de serre.

Les pratiques de non-travail du sol sont peu répandues en France, sans doute parce qu'elles nécessitent une profonde remise en cause de la gestion de l'exploitation agricole. Pour citer un exemple qui peut avoir des répercussions tant sur la production agricole que sur l'environnement, la maîtrise des mauvaises herbes est plus complexe dans des systèmes exploités sans labour. Cependant, la tendance moyenne cache des réalités diverses. En effet, de nombreux paramètres influent sur les adventices et interagissent parfois : rotation des cultures, dates de semis, retournement du sol par le labour, travaux superficiels du sol, gestion des bords de champ... Pour bien contrôler les mauvaises herbes, un agriculteur ne labourant plus doit compenser l'absence de retournement du sol en agissant sur d'autres leviers agronomiques. Ainsi, une simple suppression du labour peut modifier notablement la gestion d'une exploitation, ce qui nécessite une grande motivation et de solides compétences.

Jérôme Labreuche
ARVALIS-Institut du végétal

La station de Boigneville



rés six années d'affilée sur les mêmes parcelles. Enfin, le semis direct, qui correspond à une absence totale de travail du sol et d'enfouissement des pailles, a été pratiqué seulement sur un pour cent des surfaces françaises.

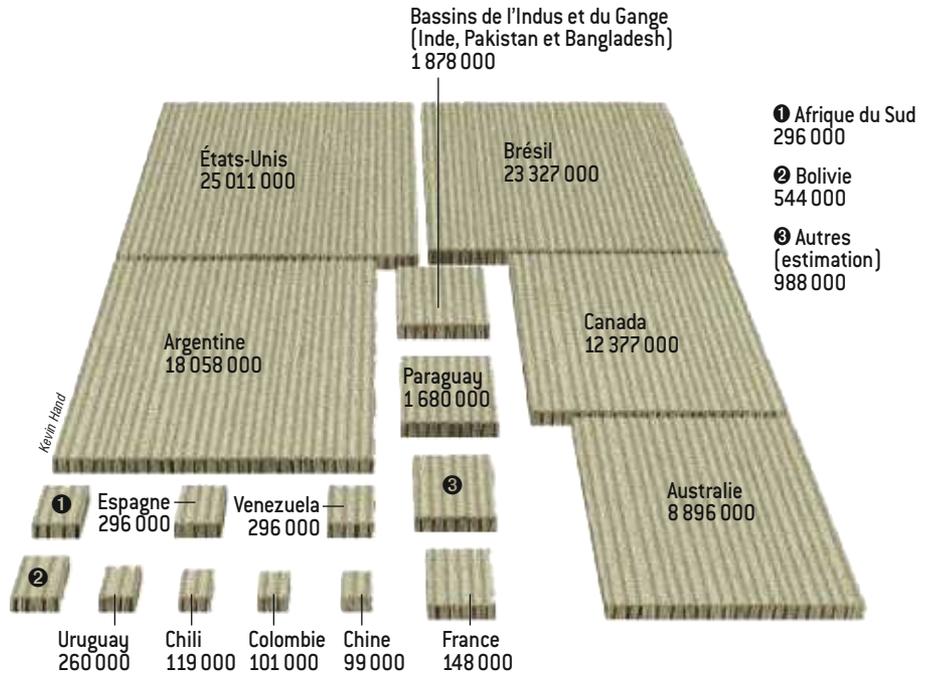
Les motivations qui ont poussé certains agriculteurs français à réduire le travail du sol sont avant tout le gain de temps et la recherche de la simplicité dans les terres difficiles à labourer. Émergent aussi le souhait de protéger les sols de l'érosion ou de favoriser l'activité biologique, par exemple celle des vers de terre.

Les techniques de travail sans labour ne se développent en France que depuis les années 1990, mais elles sont étudiées depuis plus longtemps, notamment dans l'essai de Boigneville, dans l'Essonne, mis en place

champs : diverses espèces de nuisibles peuvent apparaître, les maladies des herbes et des cultures sont différentes... Par exemple, les taux d'humidité élevés associés à l'absence de labour favorisent l'apparition de maladies cryptogamiques (dues à des champignons) que le labour tenait en échec auparavant.

Certaines de ces modifications peuvent se manifester au bout de plusieurs années, voire décennies. Les agriculteurs doivent être vigilants et s'adapter à des situations nouvelles, parfois inattendues. Lors de cette période de transition, le risque d'une diminution des rendements est réel. Aussi les agriculteurs souhaitant abandonner le labour devraient-ils commencer par une petite superficie « reconvertie », par exemple, de 10 à 15 pour cent de leur exploitation.

Les novices s'inspirent souvent des réussites voisines et participent à des groupes de soutien locaux ou régionaux,



2. LA SUPERFICIE DU SEMIS DIRECT (en hectares). Moins de sept pour cent des terres cultivées du monde le sont selon des méthodes de semis direct. Sur ces 94,5 millions d'hectares, environ 95 pour cent se trouvent en Amérique du Nord et en Amérique du Sud.

LABOUR OU NON-LABOUR ?

Comparaison de trois systèmes d'agriculture pour une rotation de cultures maïs-soja.

SEMIS DIRECT
(quatre passages au champ)

Les résidus des cultures précédentes de soja et de maïs couvrent le sol et diminuent l'érosion de 70 pour cent

Après la moisson, les chaumes et les grains perdus profitent à la faune sauvage.

Les vers de terre prolifèrent et créent des galeries qui favorisent la croissance des racines

Galerie de ver de terre

TRAVAIL DU SOL SANS LABOUR
(six passages au champ)

Les résidus de soja couvrent 30 pour cent de la surface et réduisent de moitié l'érosion.

Sans labour, la texture grumeleuse du sol améliore l'infiltration de l'eau et réduit l'érosion.

LABOUR TRADITIONNEL
(huit passages au champ)

Le sol est nu, c'est-à-dire vulnérable à l'érosion due au vent et à l'eau

La surface sombre renforce le réchauffement du sol et favorise la croissance du maïs

Le labour entraîne la formation de grosses mottes de terre qui limitent la croissance des racines, ainsi que de petites particules qui sont entraînées par la pluie

Lutter contre l'érosion

Un inconvénient majeur de l'agriculture traditionnelle est l'érosion de la couche arable. La vitesse du phénomène dépend de celle à laquelle le labour, le vent et les eaux de ruissellement déplacent la terre, mais aussi de celle du processus de dégradation par lequel les roches sous-jacentes forment une nouvelle couche arable.

Dans les années 1950, lorsqu'on s'est intéressé à l'érosion du sol cultivable, on ne disposait d'aucune donnée sur les vitesses de production du sol. On a ainsi déterminé des valeurs dites de tolérance de perte du sol à partir de ce que pouvaient faire les agriculteurs pour réduire l'érosion sans « impact économique excessif » en utilisant le matériel agricole traditionnel. Ces valeurs correspondent à 2,54 centimètres d'érosion en 25 ans. Mais des travaux récents ont montré que la vitesse de l'érosion est notablement supérieure à celle de reconstitution du sol.

Depuis plusieurs décennies, on sait que la mesure des concentrations dans le sol de certains isotopes se formant à une vitesse connue renseigne sur les

vitesse de production du sol. En appliquant cette technique aux sols des régions tempérées de la Californie et du Sud-Est de l'Australie, le géologue Arjun Heimsath, de l'Université d'État de l'Arizona a mis en évidence des vitesses de production du sol allant de 0,003 à 0,008 centimètre par an. Ainsi, il faut 300 à 850 ans pour former 2,54 centimètres de sol dans ces régions. Mes travaux indiquent une vitesse moyenne de 0,0017 à 0,0036 centimètre par an, soit 700 à 1 500 ans pour former 2,54 centimètres de sol. On est loin des 25 ans !

Si nous voulons préserver nos ressources, nous devons donc trouver des alternatives à nos pratiques agricoles. Les méthodes de semis directs en sont un exemple : par rapport aux cultures traditionnelles, elles réduisent les vitesses d'érosion du sol de plus de 90 pour cent, ces valeurs sont alors proches de celles de production du sol.

David Montgomery,
professeur de géomorphologie
à l'Université de Washington

de cinq à dix pour cent sur ces types de sols, en particulier dans les régions septentrionales. De plus, les résidus de récolte empêchent le Soleil de réchauffer la terre comme avec le labour traditionnel. Au printemps, les températures du sol sont plus froides : la germination des graines est ralentie, la croissance précoce des cultures de saison chaude, comme le maïs, est freinée.

Pendant les cinq premières années, les techniques sans labour réclament un surcroît d'engrais azotés (jusqu'à 20 pour cent) pour satisfaire aux besoins nutritionnels de certaines espèces cultivées, mais aussi parce que la matière organique bloque en surface les nutriments, dont l'azote. Et en l'absence de labour, les agriculteurs dépendent fortement des herbicides pour combattre les mauvaises herbes, celles-ci devenant de plus en plus résistantes. Le non-labour est ainsi dépendant de la mise au point de nouveaux herbicides et d'autres options de gestion des mauvaises herbes.

Les techniques sans labour peuvent offrir nombre d'avantages dans un monde confronté notamment à l'accroissement de la population, à la dégradation de l'environnement, à l'augmentation des coûts de l'énergie et au réchauffement climatique. Mais le non-labour n'est pas une panacée : il fait plutôt partie d'une vision plus large, évolutive, de l'agriculture durable, où diverses méthodes agricoles sont considérées comme saines.

Ainsi, les techniques d'agriculture biologique couronnées de succès sont instructives. L'une de ces techniques, la rotation des cultures, aide déjà le non-labour dans sa guerre contre les nuisibles et contre les mauvaises herbes en brisant leurs cycles, ce qui n'est pas le cas lorsqu'une espèce est cultivée en continu. Ce système de rotation pourrait faire progresser le non-labour et le rendre plus attractif pour les agriculteurs.

Cependant, la monoculture est fortement enracinée dans certaines régions, par exemple dans la *Corn Belt* (la « ceinture de maïs ») des États-Unis où l'on produit de l'éthanol. L'adoption du non-labour y sera sans doute difficile.

Le bien-fondé de la culture d'agrocarburants est toujours débattu, mais si nous continuons dans cette voie, les agriculteurs devront adopter la rotation des cultures sans labour afin de produire ces agrocarburants de façon durable. ■



Getty Images

3. DES TEMPÊTES DE POUSSIÈRE (le *Dust Bowl*) ont emporté la couche de terre arable des grandes plaines d'Amérique du Nord.

où ils partagent leurs expériences et discutent de leurs difficultés. Cependant, les conseils prodigués dans les régions où les techniques sans labour sont peu pratiquées peuvent être incomplets ou contradictoires, entraînant des résultats désastreux.

Autre problème, les banques ne garantiront aucun prêt à un agriculteur souhaitant abandonner le labour si elles perçoivent un risque. Ou bien, des propriétaires qui craignent une diminution de leurs revenus refuseront que les agriculteurs à qui ils louent leurs terres abandonnent le labour. En améliorant la qualité des échanges entre agriculteurs, universitaires, industriels de l'agroalimentaire et organismes gouvernementaux, on ferait sans doute un grand pas pour surmonter ces obstacles.

Pour une agriculture durable

Toutefois, les techniques sans labour ont des inconvénients. Ainsi, la production sur des sols à texture fine, mal drainés, peut être particulièrement problématique, entraînant souvent une baisse des rendements. Sans labour, les rendements du maïs, par exemple, sont souvent réduits

✓ BIBLIOGRAPHIE

J. Glover, C. Cox et J. Reganold, *Agriculture : les racines du futur*, Pour la science, janvier 2008.

D. Huggins et al., *Corn-soybean sequence and tillage effects on soil carbon dynamics and storage*, *Soil Science Society of America Journal*, vol. 71, pp. 145-154, 2007.

R. Lal, *Constraints to adopting no-till farming in developing countries*, *Soil & Tillage research*, vol. 64, pp. 1-3, 2007.

SciLogs

La nouvelle communauté de blogueurs scientifiques francophones

Grâce à **Scilogs.fr**, dialoguez avec des chercheurs et acteurs du monde des sciences aux points de vue riches et variés. De blog en blog, explorez la science avec ceux qui la font, la décryptent, l'analysent : résultats de recherche, applications pratiques, perspectives insolites, débats éthiques et politiques... Pour vivre la science au quotidien !

Signal sur bruit

Richard Taillet
Astrophysicien, professeur chercheur au LAPTh

Psycho Info

Jérôme Palazzolo
Médecin psychiatre, à Nice et à l'Université Internationale Senghor, à Alexandrie, en Égypte

Complexités

Jean-Paul Delahaye
Mathématicien, informaticien, et auteur de la rubrique *Logique et calcul* dans *Pour la Science*

Cerveau aux hormones

William Rostène et Jacques Epelbaum
Neuroscientifiques, directeurs de recherche à l'Inserm

Best of Bestioles

Loïc Mangin
Rédacteur en chef adjoint
Pour la Science

Retrouvez aussi les autres communautés «SciLogs» : déjà plus 140 blogueurs scientifiques à l'international !

Alterscience

Alexandre Moatti
Polytechnicien, chercheur en histoire des sciences au laboratoire SPHERE

Prospective Spatiale

Christophe Bonnal
Expert en astronautique, président des commissions «Débris spatiaux» à l'IAA et l'IAF



Connectez-vous maintenant pour découvrir www.Scilogs.fr !



Suivez les dernières actualités des blogueurs également sur les réseaux sociaux

Proposé par **POUR LA SCIENCE**

Les sols

à l'épreuve du temps

Dominique SCHWARTZ

Dans les sols, le temps s'imprime de façon différente selon les constituants. Il est nécessaire de discerner chacun d'eux pour reconstituer la dynamique et l'histoire des paysages.

De la parcelle au continent, de la saison au million d'années, brutalement ou imperceptiblement, les paysages de notre planète évoluent en permanence. Quelle que soit l'échelle d'observation, les lieux, leurs constituants et leurs structures, les populations végétales, animales et humaines qui y vivent, subissent des changements sous l'action conjuguée de dynamiques internes et de forces extérieures climatiques, tectoniques, anthropiques...

Ces évolutions se sont accélérées à mesure qu'a augmenté l'emprise exercée par les sociétés humaines sur leur cadre de vie. Aujourd'hui, les quantités de matières injectées par l'homme dans le système planétaire sont du même ordre de grandeur que les flux naturels quand elles ne les dépassent pas. Les effets directs de l'activité humaine, leurs conséquences

1. CES PIVOTS RACINAIRES sont fossilisés dans des podzols (des sols caractérisés par des horizons supérieurs blancs et sableux, et des horizons inférieurs bruns à noir, enrichis en matière organique). La datation de ces pivots racinaires, par la méthode au carbone 14, et l'identification des espèces auxquelles ils se rapportent ont mis au jour l'histoire de cette région : une forêt occupait les lieux à l'époque où ces podzols se sont formés, puis elle a laissé la place à la savane actuelle, il y a 3000 ans.

réelles ou supposées sur le long terme, la nécessité de disposer d'éléments de comparaison avec les situations passées expliquent que les dynamiques environnementales ou paléoenvironnementales sont de plus en plus étudiées.

La reconstitution de ces dynamiques s'appuie sur trois types d'indicateurs. Grâce aux premiers, on reconstitue les « états » d'un système à un instant donné. Les deuxièmes mettent en évidence les mécanismes qui président aux changements d'états. Les derniers autorisent le calage chronologique et l'évaluation de la vitesse.

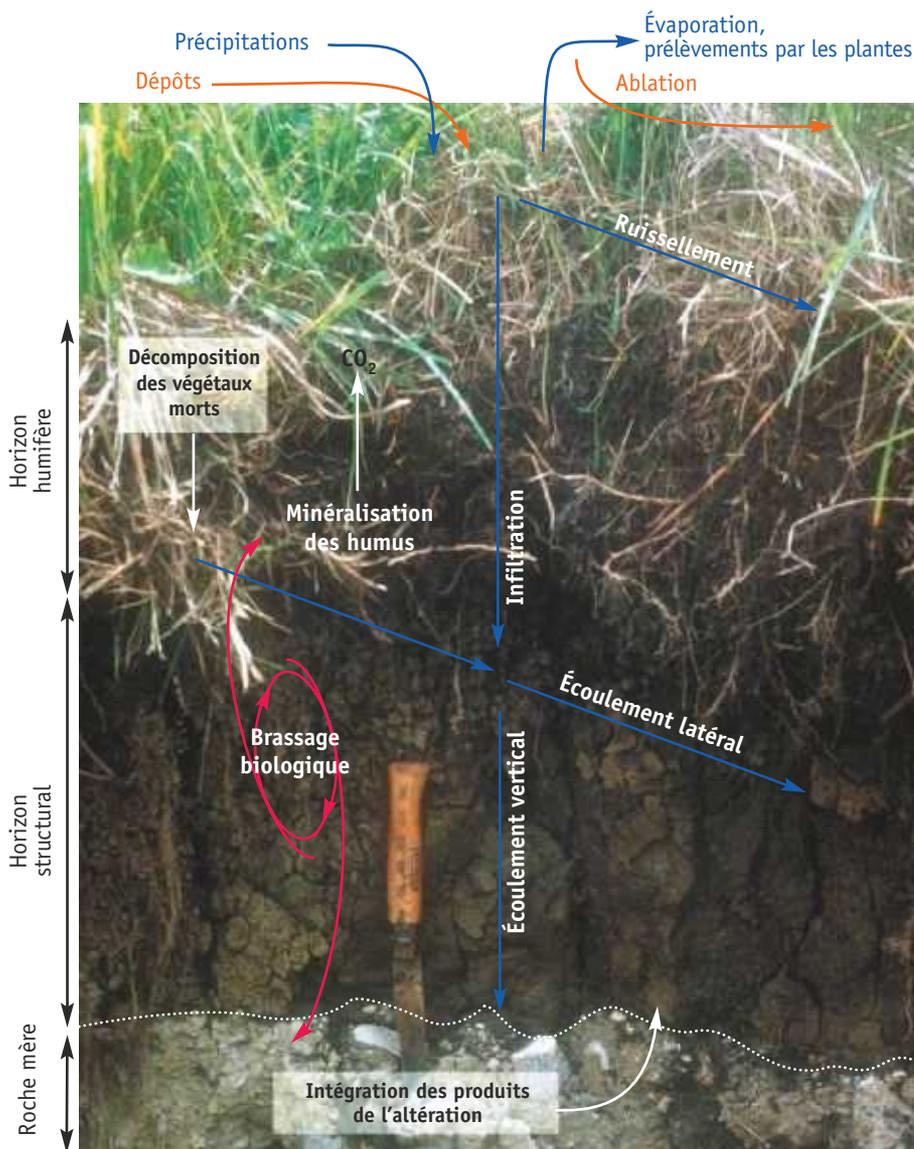
Quand on s'intéresse aux dynamiques récentes, c'est-à-dire s'étalant sur quelques années, les indicateurs sont légion, car ils résultent de mesures directes hydrologiques, climatiques, géochimiques... Dès que l'on atteint des durées séculaires, celles-ci sont plus rares : excepté les enregistrements météorologiques, les cartes topographiques et, dans une moindre mesure, les archives photographiques, on ne dispose pas de séries de données continues de longue durée.

À ces temps séculaires ou supérieurs, les approches indirectes, fondées sur l'étude des enregistrements sédimentaires, sont privilégiées. En effet, abondants dans de nombreux milieux continentaux ou marins, les sédiments sont

le plus souvent faciles à dater, et ce, à des résolutions temporelles de plus en plus fines (voir l'article d'Édouard Bard dans ce numéro). Toutefois, certaines de leurs caractéristiques constituent autant d'inconvénients. Par exemple, les dépôts sédimentaires peuvent être alimentés par une étendue importante et caractérisent donc une situation « moyenne » sur cette zone. La résolution spatiale de l'indicateur est alors faible et empêche l'accès aux évolutions locales précises. Par ailleurs, les dépôts sédimentaires présentent des lacunes spatiales ou chronologiques d'origines variées. Enfin, les conditions favorables au dépôt influent parfois sur les caractéristiques du sédiment et sa conservation. Ces caractéristiques sont autant de biais potentiels.

Les sols, des systèmes ouverts

Les marqueurs pédologiques constituent une autre famille d'indicateurs qui s'affranchissent de ces inconvénients. D'abord, les sols forment une couverture continue, facile d'accès. De plus, la grande diversité des constituants du sol offre une large gamme d'indicateurs. Enfin, les enregistrements étant ponctuels sur le plan spatial, le signal obtenu est pur et non une résultante. On peut alors spatialiser les résultats en multipliant les prélèvements d'échantillons.



2. LES SOLS sont des réacteurs biologiques, physiques et chimiques. On distingue plusieurs niveaux, nommés horizons : ici, l'horizon humifère, enrichi en matières organiques végétales transformées et l'horizon structural composé d'argile. Le sol se développe à partir de la roche mère dont il est séparé par le front d'altération (*en pointillés blancs*). Cette ligne descend à mesure que la roche mère est altérée et que les produits sont intégrés au sol. Dans chacun des horizons, les matières sont importées, transformées et exportées. Par exemple, l'eau (flèches bleues) est apportée par les précipitations, puis ruisselle ou s'écoule dans toutes les directions (verticalement sous l'effet de la gravité et latéralement sous l'effet de la pente); elle est aussi évacuée par évaporation ou par les prélèvements des végétaux.

Grâce à ces méthodes, on a récemment reconstitué la dynamique d'une forêt d'okoumés, un bois utilisé pour la fabrication du contreplaqué (*voir l'encadré de la page 48*), située au Congo. La difficulté de l'étude des sols consiste à y démêler les fils du temps. Après avoir défini un sol, nous examinerons les aspects théoriques et quelques-unes des applications de cette tâche qui incombe au pédologue.

Les sols constituent des milieux ouverts, soumis à d'incessants flux de matière et d'énergie. On peut y voir des réacteurs où s'altèrent, se transforment, naissent ou disparaissent des matériaux

très variés. Les processus associés sont biologiques, physiques ou chimiques (*voir la figure 2*), et dépendent des conditions du milieu et des flux de matière et d'énergie qui alimentent le réacteur.

Les principaux flux sont composés d'eau, d'éléments minéraux et de matière organique. L'eau provient surtout des pluies, mais aussi de remontées des nappes et d'apports latéraux depuis les sols situés en amont sur un versant. Elle transporte des éléments dissous qui enrichissent les réserves minérales du sol. Quand les pluies sont trop fortes ou lorsque le sol est déjà saturé en eau, les pluies ruissellent et entraînent une abla-

tion du sol. Dans le cas inverse, l'eau s'infiltré, solubilisant au passage des éléments minéraux qu'elle exporte jusque dans les nappes ou dans les cours d'eau.

Les éléments minéraux qui pénètrent dans un sol sous une forme solide ont trois origines principales. En surface, ils sont le fait d'apports sédimentaires qui recouvrent le sol et résultent du ruissellement depuis les versants amont, de dépôts alluviaux ou, dans les zones arides, de l'action du vent. Épisodiquement, ces dépôts sont brutaux et épais : ils fossilisent alors l'ancien sol, qui devient un paléosol enfoui.

À la base du sol, les minéraux entrent grâce à la lente progression du haut vers le bas du front d'altération, c'est-à-dire de la ligne qui sépare le sol du matériau géologique sain, la roche mère. Certains de ces minéraux, tels le quartz ou les minéraux lourds, sont hérités du matériau initial sans transformation. D'autres sont modifiés, par exemple, les micas deviennent de l'argile par microdivision. Enfin, les derniers disparaissent complètement, par dissolution. La dernière source de minéraux est interne au sol : des minéraux se forment *in situ* par la recombinaison d'ions solubilisés lors de l'altération de minéraux primaires.

La matière organique des sols provient quasi exclusivement de la transformation de débris végétaux par la microflore, tels les bactéries et les champignons, ainsi que par la mésofaune, en particulier les lombrics et les termites. Cette transformation libère, d'une part, du gaz carbonique qui retourne dans l'atmosphère et, d'autre part, différentes substances carbonées qui forment avec l'argile et les cations métalliques des complexes plus ou moins stables.

Par ailleurs, les matériaux du sol sont le siège de mouvements mécaniques. Certains, purement physiques, résultent du gonflement et de la rétraction des argiles consécutifs aux variations d'humidité du sol. Cependant, les mouvements les plus importants sont liés à l'activité biologique du sol. Ces mouvements, nommés bioturbation, brassent des matériaux remontés sous des formes variées par des animaux, tels les vers de terre et les taupes, ou ceux qui s'enfoncent corrélativement. Par exemple, les termites remontent, vers la surface, un mètre de sol par millénaire. Par ailleurs, plus de

un pour cent du sol passe chaque année dans le tube digestif des lombrics, des organismes à propos desquels, en 1881, Charles Darwin doutait « que beaucoup d'autres animaux aient joué dans l'histoire du monde un rôle aussi important que ces créatures à l'organisation si sommaire ».

L'ensemble de ces mouvements est un des facteurs essentiels qui gomme avec le temps les structures géologiques héritées de la roche mère, discernables dans les sols peu évolués.

Au final, ces nombreux processus sont à l'origine de la grande variété des constituants pédologiques, dont la nature précise dépend des conditions de milieu. Ces constituants constituent une sorte de signature, plus ou moins spécifique, de ces conditions, dont ils sont autant d'indicateurs. Les processus de transfert de matière et de réorganisation structurale entraînent la formation d'entités morphologiques élémentaires, nommées horizons (par exemple, la couche d'humus est l'horizon humifère). Dans un tel système ouvert et transformant, que devient l'information ? En d'autres termes, comment aborder les problèmes de temps, de chronologie et d'archivage dans les sols où les constituants ne font que transiter ?

Temps du sol et temps sédimentaire

Les processus décrits précédemment montrent que le problème diffère de celui des systèmes sédimentaires. Pour ces derniers, le temps est figé et fossilisé. Il se superpose strate après strate et, si l'on excepte les phases précoces de diagenèse (les processus de diagenèse induisent la compaction et la cimentation du sédiment, des substitutions ioniques et des recristallisations), le temps est le même pour tous les constituants. En revanche, dans les sols, il se télescope au sein d'un même matériau où chaque constituant a son propre temps. Celui-ci dépend, d'une part, des rythmes du fonctionnement des sols et, d'autre part, du mode d'intégration du constituant au sol. Les rythmes de fonctionnement sont journaliers quand ils suivent l'activité biologique du sol ; décennaires selon le rythme des événements pluviométriques ; saisonniers en fonction des rythmes climatiques et écophysologiques ; annuels à

pluriannuels selon les cycles agricoles et les petites crises climatiques ; séculaires lorsqu'ils reflètent les crises climatiques majeures, les cycles sylvigénétiques et les modes d'occupation du sol ; millénaires enfin à l'échelle de la pédogenèse et des variations paléoclimatiques. Ces rythmes sont emboîtés et entraînent un mélange du temps.

Le mode d'intégration des constituants est illustré par deux exemples. Dans un sol, la matière organique la plus récente, celle qui provient de la décomposition des litières végétales, est presque en totalité dans les horizons supérieurs du sol. En revanche, les fractions anciennes prédominent dans les niveaux profonds du sol. Cette répartition est inverse pour les éléments minéraux : les premiers à pénétrer dans le sol après l'altération de la roche mère sont actuellement situés à proximité de la surface du sol, tandis que les plus tardifs sont au contact direct du front d'altération.

Ainsi, la question du temps est complexe. On ne peut l'aborder globalement, mais uniquement constituant par constituant. L'âge du sol n'est pas nécessairement celui de ces constituants, ceux-ci y séjournant pour des périodes variables avant leur disparition. Malgré l'impression d'une joyeuse pagaille, des règles strictes permettent de s'y retrouver.

Les erreurs les plus fréquentes sont les confusions entre strate et horizon. Or la succession des horizons d'un sol n'a pas de valeur chronologique. Ainsi, dans certains sols, on observe systématiquement sous l'horizon humifère de la surface, la succession d'un horizon, nommé E, appauvri en argile et

d'un horizon, nommé BT, enrichi en argile lessivée. Cette succession n'indique aucune chronologie : la formation des deux horizons est concomitante, l'appauvrissement en argile du premier nourrissant l'enrichissement du second par un transfert mécanique, le lessivage. Les deux horizons se forment simultanément au sein d'un matériau au départ indifférencié.

L'âge des matières organiques

Des éléments organiques d'âge très différent coexistent dans le sol. Les plus anciens y sont entrés il y a plusieurs millénaires alors que les plus récents résultent de la décomposition des feuilles tombées lors de l'année en cours ou de l'exsudation par les racines. Entre ces extrêmes, les apports sont annuels et plutôt réguliers, car un équilibre dynamique s'établit entre les entrées par décomposition des matières organiques fraîches et les sorties par minéralisation des matières organiques de l'humus. Cette minéralisation résulte de l'activité biologique qui transforme la matière organique en dioxyde de carbone et en éléments minéraux, tels les ions NH_4 et NO_3 . Une datation par le carbone 14 de ces matières organiques fournira un âge « moyen » de l'ensemble.

Toutefois, on observe parfois un fait troublant : des datations effectuées à différentes profondeurs révèlent l'existence d'un gradient d'âge croissant. Ce gradient est de l'ordre de 2 500 à 6 000 ans par mètre selon les sols. Ainsi, malgré l'intensité des flux de matière et la bioturbation, la répartition chronologique des matières organiques n'est pas aléatoire. Ce paradoxe, qui renforce la confusion entre strate et sédiment, n'est pourtant



3. LES CHARBONS DE BOIS (en noir) enfouis dans le sol vieillissent tandis que les matières organiques, en permanence renouvelées, ont un âge apparent « constant ». Les datations au carbone 14 des charbons ne renseignent donc pas sur l'âge des matières organiques.

qu'une simple convergence, et les mécanismes en cause diffèrent.

Une première explication tient à la décroissance de l'activité biologique avec la profondeur: en conséquence, les matières organiques de l'humus, et le carbone qu'elles contiennent, y auraient une espérance de vie plus longue que dans les horizons supérieurs du sol. Néanmoins, cette explication est insuffisante et nécessite l'étude de la répartition des matières organiques dans le sol pour être complétée.

On distingue deux types de matière organique des sols (voir la figure 4). La première est la matière organique stable, peu minéralisable par la microflore ou la mésofaune du sol. Elle est

surtout composée de polyphénols et des tannins qui colorent les feuilles mortes en brun. Cette matière organique, dont l'âge moyen est très élevé, de l'ordre de plusieurs milliers d'années, est répartie uniformément sur toute la profondeur du sol par l'activité biologique qui y règne. Les matières organiques du deuxième type sont labiles, c'est-à-dire facilement minéralisables, tels les sucres solubles, la cellulose. Ces matières organiques sont surtout représentées dans les horizons supérieurs du sol où, en raison de leur courte espérance de vie (environ quelques années), elles ont peu de chances d'être entraînées en profondeur par l'activité biologique.

Cette répartition des matières organiques explique l'accroissement progressif de l'âge apparent des matières organiques avec la profondeur: en surface, où les matières organiques labiles sont majoritaires, l'âge apparent est faible; en profondeur, la situation inverse prévaut, et l'âge apparent dépasse parfois 15 000 ans. Dans les zones intermédiaires, l'âge croît selon un gradient.

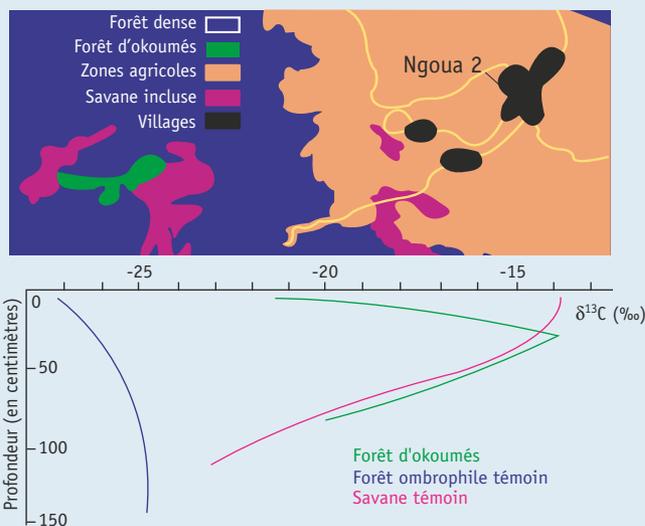
Cette convergence avec la stratigraphie est dangereuse, car elle est trompeuse: les horizons sont des unités d'iso-fonctionnement et non des unités chrono-stratigraphiques. Dans un sol, l'âge des matières organiques n'augmente pas avec le temps. Puisque les apports annuels et la minéralisation s'équilibrent,

Une dynamique paysagère révélée par les archives pédologiques

Le village de Ngoua 2 est situé, au Congo, dans une zone de forêt dense (voir le plan) dégradée en de nombreux endroits par les activités agricoles et parsemée de petites savanes dites incluses, d'origine paléoclimatique. La dynamique forestière de la région a été étudiée par le CIRAD dont les équipes se sont particulièrement intéressées à une forêt séparant deux savanes incluses. Cette forêt est constituée d'okoumés, une essence pionnière qui caractérise une reconquête sur des espaces ouverts. Cette forêt monospécifique marque-t-elle une reprise forestière sur les savanes? Dans ce cas, les deux savanes aujourd'hui disjointes auraient dans un premier temps constitué une formation unique. Cette forêt suit-elle plutôt une jachère? Les limites de la forêt seraient alors celles d'un ancien défrichement agricole abandonné après quelques années de culture.

La question n'est pas anodine, car l'okoumé est une essence commerciale de premier ordre, utilisée notamment pour la fabrication de contreplaqué. Y répondre aiderait à la mise au point de méthodes de sylviculture favorables au développement de l'okoumé. Par exemple, dans la première hypothèse, une défense des savanes incluses contre les feux de brousse empêcherait la destruction des jeunes arbres germant en savane. Dans la seconde hypothèse, on prônerait un mode d'agriculture extensive et itinérante compatible avec le tempérament pionnier de l'okoumé.

Une réponse est venue de l'étude de la teneur en carbone 13 des matières organiques des sols. Le carbone 13 est un isotope stable du carbone, dont la teneur est plus élevée dans les graminées de savane que dans les autres plantes. Les matières organiques des sols de savane diffèrent donc de celles provenant des autres types de végétation. Nous avons comparé les profils isotopiques (les quantités de carbone 13 en fonction de la profondeur) de sols d'une forêt plurimillénaire, de celui de la forêt d'okoumés et celui d'une savane incluse adjacente. Dans le sol de la vieille forêt, les matières organiques sont très appauvries en carbone 13 (courbe bleue) et les quantités sont relativement constantes sur l'ensemble du profil. Le profil du sol de la savane (courbe rose) montre que les horizons supérieurs sont riches en carbone 13, tandis que dans les horizons profonds subsistent



encore, en raison d'un taux de renouvellement faible, des matières organiques héritées d'épisodes forestiers datant d'il y a plus de 3 000 ans. Enfin, le profil (courbe verte) de la forêt d'okoumés se superpose presque parfaitement au profil de savane, à l'exception de sa partie superficielle. Dans ces quelques centimètres, qui correspondent aux horizons humifères, le taux de renouvellement des matières organiques est important. Le signal caractéristique de la savane a été remplacé par un signal plus récent, correspondant à la forêt d'okoumés.

Ainsi, la forêt d'okoumés illustre une reconquête forestière sur une savane et non sur une jachère, qui aurait un signal identique à celle de la vieille forêt. De plus, l'allure générale du profil de cette forêt montre qu'elle est très récente. En effet, les horizons situés à environ 20 centimètres de profondeur ont un signal encore typique des savanes. Or, à cette profondeur, le renouvellement des matières organiques est encore très rapide. On peut alors dater la reconquête forestière à moins d'un siècle. L'analyse dendrochronologique a affiné cette datation: les okoumés les plus vieux avaient, au moment de l'étude, environ 40 ans.

leur âge moyen reste constant : dans un sol ferrallitique (ces sols rouges ou jaunes, typiques des milieux équatoriaux, sont caractérisés, entre autres, par une accumulation de fer et d'aluminium sous forme d'oxydes et d'hydroxydes) vieux de plusieurs millions d'années, l'âge apparent des matières organiques est de quelques dizaines d'années en surface et ne dépasse pas 4 000 ans à un mètre de profondeur.

Cette « constance » dans le temps ne s'applique pas à l'âge des charbons de bois conservés dans le sol. Ils témoignent d'événements particuliers, tels des incendies, épisodiques sur la durée de l'histoire du sol. Souvent réduits à une taille minuscule, ils se conservent bien dans les sols, où ils sont abondants. À l'inverse de la matière organique de l'humus, ils vieillissent, et leur datation fournit des âges absolus (voir la figure 3). Le plus souvent, il n'y a aucune relation entre l'âge des charbons et celui des matières organiques ; aussi est-il vain d'utiliser des datations au carbone 14 obtenues sur des charbons pour dater des évolutions écologiques enregistrées par la matière organique des sols.

Par ailleurs, il convient de nuancer les interprétations données à la datation de charbons selon leur mode de répartition. En lignes continues, peu épaisses, ils datent la mise en place du matériau supérieur. En revanche, dispersés sur l'épaisseur du sol, ils peuvent témoigner d'un mouvement de terrain important à l'échelle du versant, ou d'intenses phénomènes de bioturbation.

Les âges obtenus par l'analyse des fragments de charbon datent des épisodes d'incendies, dont l'origine naturelle ou anthropique doit être recherchée par d'autres critères, tels les associations avec des industries humaines ou le type de végétation.

Trois familles d'archives

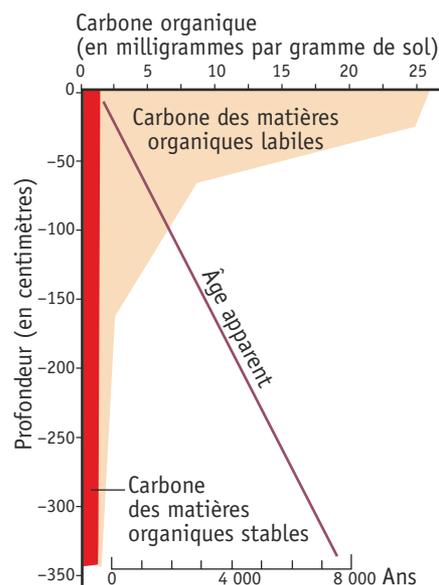
À partir des exemples précédents, on peut aborder de façon plus générale les rapports entre les temps inscrits dans les constituants pédologiques et l'information qu'ils fournissent sur l'environnement. Ainsi, les matières organiques constituent de bons indicateurs de l'évolution des végétations, mise en évidence par l'étude isotopique, par exemple, du carbone 13 dont les quantités varient

selon le type de végétaux, ou biochimique, notamment en étudiant les lignines (les protéines majoritaires du bois). La durée d'archivage du signal environnemental est une fonction directe de l'espérance de vie des matières organiques dans le sol, car les matières organiques se renouvellent en permanence. Cette espérance de vie est courte, de l'ordre de quelques dizaines d'années, dans les horizons supérieurs du sol. Ceux-ci ne révéleront alors que des dynamiques au mieux séculaires.

Puisque les matières organiques se renouvellent lentement dans les horizons profonds, ceux-ci n'enregistreront pas les épisodes courts, qu'ils soient récents ou anciens. Toutefois, ils se prêtent bien à l'enregistrement de changements de grande ampleur chronologique. Un tel indicateur, qui dépend d'équilibres dynamiques entre flux entrant et sortant définissant une espérance de vie au sein du sol, peut être qualifié d'« archive transitoire ».

Les charbons ont une utilité très précise pour la chronologie absolue, voire l'identification de végétations. Cependant, les événements à l'origine de leur incorporation dans le sol n'appartiennent pas au fonctionnement pédologique normal. C'est la raison pour laquelle le terme d'« archive événementielle » caractérise le mieux ce type d'indicateur pédologique. Enfin, on peut définir un troisième type fondamental, l'« archive cumulative », qui correspond, par exemple, aux accumulations organiques, nommées alios, dans les podzols (voir la figure 1), des sols très sableux et acides. Les matières organiques sont solubilisées dans les litières et dans les horizons de surface, puis percolent dans le matériau sableux avant de précipiter en profondeur, sous la forme de complexes organométalliques particulièrement résistant à la minéralisation. Dans ce système semi-ouvert, avec des entrées annuelles et quasiment pas de sorties, le stock organique de ces alios croît avec le temps.

Cette « classification » des archives a une portée bien plus large que celle des simples exemples décrits ici. Les pollens ou les phytolites (des éléments siliceux fréquents dans les céréales) sont des archives biologiques transitoires dans les sols, car ils sont inévitablement dégradés. Les engrais marqués à l'azote



4. LA MATIÈRE ORGANIQUE se répartit dans deux compartiments. La matière organique stable (en rouge), c'est-à-dire peu minéralisable, est répartie uniformément sur l'ensemble du sol. En revanche, la matière organique labile (en orange), très facilement minéralisable, est surtout présente dans les horizons supérieurs du sol. Ce modèle de répartition explique l'accroissement progressif de l'âge apparent (la courbe violette) des matières organiques avec la profondeur.

15 sont un autre type d'archive transitoire utile pour l'étude de la dynamique des nitrates sur des échelles de temps allant de la saison à la dizaine d'années.

Très peu altérés, les minéraux lourds hérités des roches mères sont des archives cumulatives grâce auxquelles, d'une part, on étudie l'origine du matériau parental du sol et, d'autre part, on établit des bilans quantitatifs de vitesses d'altération. Le césium 137, intégré dans les sols à la suite de l'accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl, est une archive événementielle dont le monde se serait bien passé. Dans les sols, il constitue un repère chronologique bien identifiable exploité pour dresser des bilans très précis de l'épaissement ou de l'érosion des sols depuis 1986.

On pourrait multiplier les exemples. Les sols ne manquent pas de ressources quand il s'agit d'appréhender les dynamiques environnementales. Sachons simplement y dénouer les fils du temps.

Dominique SCHWARTZ est pédologue et biogéographe. Directeur de recherches à l'IRD, il est détaché en tant que professeur de géographie à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg.

Dominique SCHWARTZ, *Expansion et recul des forêts équatoriales*, in *Pour la Science*, n° 271, mai 2000.

Merveilleux nombres premiers

Voyage au cœur de l'arithmétique

Jean-Paul Delahaye

Nouvelle
édition

Jean-Paul Delahaye

Merveilleux nombres premiers

Voyage au cœur de l'arithmétique

Nouvelle
édition

Belin POUR LA SCIENCE

Les nombres premiers fascinent. Connus dès les débuts de l'arithmétique, ils ont excité la curiosité de milliers de mathématiciens. Ils sont au cœur de la science des nombres, car tout entier se décompose de façon unique en un produit de facteurs premiers. Dans cet ouvrage, l'auteur mêle éclaircissements théoriques et anecdotes piquantes.

Éditions Belin/Pour la Science 2013
296 pages — 28 euros
ISBN 978-2-8424-5117-2

Disponible en librairie et sur www.pourlascience.fr/librairie

Entre terre et mer : des zones à préserver

Les zones humides du littoral, sols gorgés d'eau, sont parmi les plus riches écosystèmes de la planète. Leur protection est devenue un enjeu majeur pour le maintien de la biodiversité.

Fernand Verger

L'ESSENTIEL

- ✓ Le zones humides existent sous de multiples formes : estuaires, deltas, plaines alluviales, marais, étangs, tourbières, barrières de corail...
- ✓ Convoitées pour leur fertilité, elles sont drainées, asséchées et cultivées depuis des siècles.
- ✓ Leur disparition s'est accélérée au XX^e siècle avec l'urbanisation, l'industrialisation et l'agriculture intensive.
- ✓ Depuis 40 ans, on tente de les protéger tant pour la richesse de ces écosystèmes que pour leur valeur économique et sociale.

En 2010, la tempête Xynthia a envahi des zones humides du littoral vendéen. Des lotissements et un camping avaient été construits sur ces zones, que l'on avait tenté de soustraire aux marées au moyen de digues. Cette tempête aux conséquences tragiques a mis sur le devant de la scène la question de la gestion raisonnée des zones humides. Rien qu'en France, ce patrimoine naturel couvre plus de trois millions d'hectares, dont près de la moitié sur le littoral. Aujourd'hui, alors que leur disparition s'accélère, on mesure leur rôle dans l'équilibre écologique de la

planète. Pourquoi ces zones disparaissent-elles ? Quelles sont les conséquences de leur disparition sur les écosystèmes ? Quelles solutions sont mises en place ou envisagées pour les protéger ? Telles sont les questions que nous examinerons ici. Mais auparavant, précisons ce qu'est une zone humide.

C'est un domaine où l'eau est présente soit en profondeur dans les sols, soit en surface, et ce de façon permanente ou saisonnière. Une succession de définitions légales en ont été données à partir des années 1970, lorsqu'il s'est agi de les protéger, notamment aux États-Unis et en France. Parmi les



multiples critères retenus pour les définir, on trouve des indications hydrologiques (niveaux des eaux de surface ou de la nappe phréatique), le caractère hydromorphe des sols (la marque physique d'une présence régulière de l'eau) et la composition de la flore. Les roseaux, les typhas, les laïches ou les iris des marais sont des espèces hygrophiles (qui ont besoin d'humidité pour vivre) caractéristiques des zones humides en milieu d'eau douce; dans les milieux salés ou saumâtres, d'autres espèces telles les spartines, obiones ou salicornes, halophiles celles-là – c'est-à-dire se développant dans un milieu salé –, sont caractéristiques des zones humides tempérées (voir la figure 2); les palétuviers poussent dans les zones humides situées entre les tropiques.

Il existe des zones humides à l'intérieur des terres, là où le drainage est médiocre, par exemple dans les fonds de vallée tourbeux ou sur le bord des lacs. Mais c'est sur les littoraux maritimes qu'elles sont les plus nombreuses, dans des situations très diverses allant des fonds marins peu profonds aux marais en arrière des dunes, en passant par les plaines alluviales façonnées au fil des siècles par les marées sur les rives ou à l'embouchure des fleuves.

Par convention, les fonds marins de moins de six mètres de profondeur au-dessous des plus basses mers sont considérés comme des zones humides. Les fonds coralliens entrent en grande partie dans cette catégorie. La Grande Barrière de Corail, qui s'étend en avant de la côte australienne sur

une longueur de 2300 kilomètres, constitue ainsi une zone humide littorale d'une prodigieuse biodiversité. Les recensements y ont dénombré plus de 300 espèces de coraux, plus de 800 espèces d'échinodermes, plus de 1500 espèces de poissons et plus de 150 espèces d'oiseaux.

Plaines alluviales, estuaires, marais...

Les étendues alluviales, tour à tour immergées et découvertes au gré des marées, abritent aussi une flore et une faune abondantes et variées. La mer des Wadden, qui s'étend en arrière des îles Frisonnes, de la Hollande jusqu'au Jutland, au Danemark, offre près de 10000 kilomètres carrés de vasières et de bancs de sable de ce type. Par le balancement des marées, ces surfaces nourrissent une riche faune de mollusques et de crustacés. Les rives sont colonisées par une végétation qui supporte la submersion par les eaux salées (spartines, salicornes...). L'abondance de nourriture (mollusques, crustacés) fait des vasières de la mer des Wadden l'une des plus importantes zones de transit des oiseaux migrateurs: ce domaine peut accueillir simultanément jusqu'à six millions d'oiseaux.

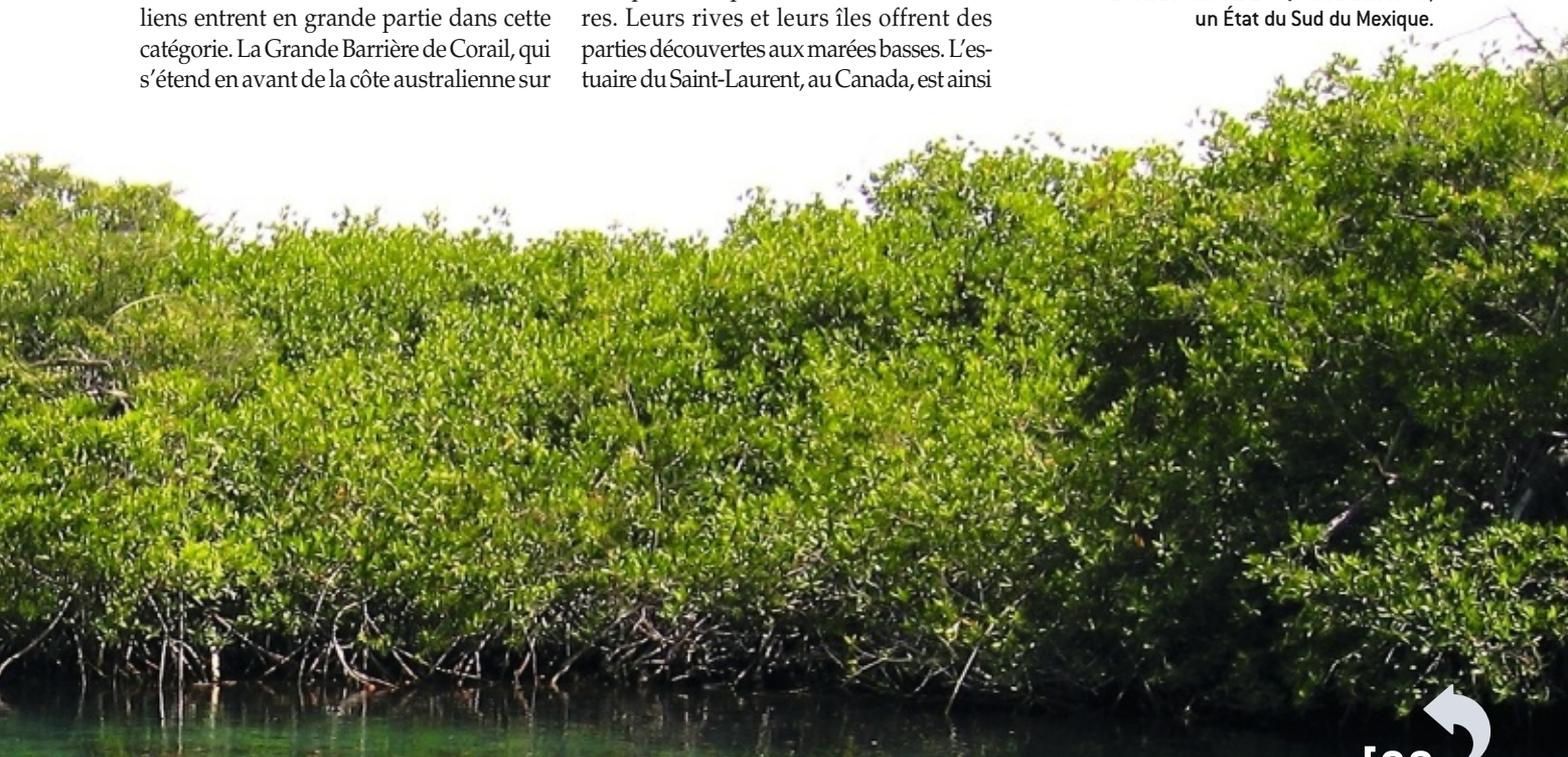
Par les estuaires soumis au flot et au jusant, des rubans de zones humides littorales pénètrent profondément dans les terres. Leurs rives et leurs îles offrent des parties découvertes aux marées basses. L'estuaire du Saint-Laurent, au Canada, est ainsi

composé, auprès d'un lit mineur, de marais riverains, de vasières découvrautes et d'îles soumises au gel hivernal. La biodiversité varie en fonction de la salinité, laquelle s'accroît vers l'aval, de même que le nombre de poissons. L'estuaire du Saint-Laurent est en particulier remarquable par l'abondance des cétacés et des phoques, dont on y dénombre 16 espèces.

Les deltas construits par les fleuves étalent leurs plaines alluviales marécageuses entre des bourrelets de berge et des cordons littoraux. Le delta commun du Gange et du Brahmapoutre, qui s'étend sur 105000 kilomètres carrés, est le plus grand delta du monde. Les palétuviers de la mangrove y occupent de grandes superficies et bordent le rivage de deux ceintures. La plus proche de la mer est le plus souvent constituée de palétuviers rouges (*Rhizophora*) pouvant atteindre 30 mètres de hauteur. Elle est en général doublée d'une seconde ceinture de palétuviers blancs (*Avicennia*) moins élevés. Vers l'intérieur, la mangrove est parfois bordée de surfaces herbeuses sursalées qu'on nomme des tannes. Les bras fluviaux mouvants érodent et façonnent les îlots du delta – ou chars –, qui sont souvent cultivés.

Enfin, l'action de la mer tend à créer des cordons littoraux de sable ou de galets

1. MANGROVE DU QUINTANA ROO, un État du Sud du Mexique.



qui restreignent le libre écoulement des eaux fluviales et pluviales, enserrant des lagunes et construisent des marais. Par exemple, en arrière des dunes de Monts et de celles de l'île de Noirmoutier, le marais breton-vendéen étend des terres argileuses qui supportent des prairies humides, enserrées dans un réseau de fossés et de canaux.

Les zones humides disparaissent

Beaucoup de zones humides ont disparu depuis un siècle ; celles qui subsistent ont souvent connu une dégradation d'une ampleur considérable. Le caractère général de cette évolution accélérée suscite l'inquiétude des écologues. Les facteurs de cette évolution sont nombreux et variés, mais leurs effets convergent.

Déjà au Moyen Âge, on cherchait à conquérir des terres sur la mer et les estuaires pour en faire des terres agricoles ; foyers de paludisme, refuges des hors-la-loi, les marais et autres zones humides avaient mauvaise réputation et l'on s'est efforcé, pendant des siècles, de les drainer pour les

2. LES DIFFÉRENTS TYPES de zones humides littorales définis par la Convention internationale de Ramsar, datant de 1971, ont été rassemblés sur cette frise. Trois littoraux sont distingués : les côtes méditerranéennes, les côtes tempérées à marées et les côtes à mangroves.

soustraire aux inondations et les « assainir ». Ces sols étant particulièrement fertiles, nombre d'acteurs – populations locales, mais aussi communautés religieuses, noblesse, sociétés privées, États – ont encouragé les entreprises d'assainissement et d'endiguement afin de transformer ces terrains en parcelles cultivables.

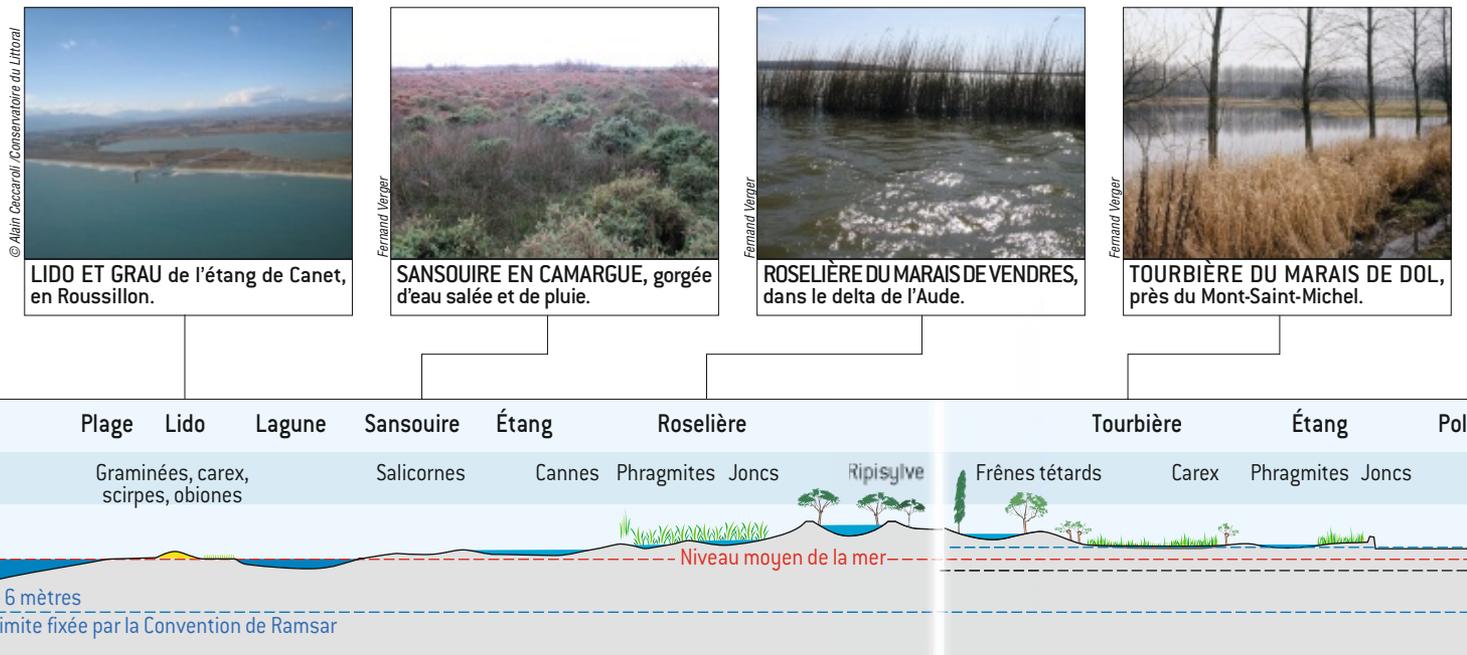
Cette tradition, qui s'est manifestée aussi bien en Europe occidentale qu'en Extrême-Orient, s'est accélérée au cours du dernier siècle. Elle a été particulièrement marquée aux Pays-Bas, où de nombreux polders – des terrains endigués situés sous le niveau de la mer – ont été construits et asséchés. La région a toutefois amorcé un renversement de cette politique dans les années 1980 en abandonnant le projet d'assèchement du Markerwaard, dernier grand polder prévu, non loin d'Amsterdam. Ce renversement n'est toutefois pas universel. En Corée du Sud, notamment, les endiguements se poursuivent à des fins agricoles, mais aussi industrielles, urbaines et touristiques. Une grande digue, longue de 33,9 kilomètres, la plus longue du monde, isolant de la mer Jaune l'immense domaine de Saemangum, y a été achevée en 2010, malgré une vigoureuse opposition des défenseurs de la nature (voir la figure 2).

De façon générale, en France, jusqu'à la fin des Trente Glorieuses, une politique d'intensification agricole sans retenue a privilégié les labours aux dépens des prairies naturelles. La culture des céréales

s'est développée sur des terres drainées dans une gestion hydraulique visant exclusivement à augmenter la production. C'est ainsi que dans le marais Poitevin, les champs cultivés se sont substitués le plus souvent aux prairies naturelles.

Dans les grands estuaires, tel celui de la Seine, des aménagements portuaires ont détruit les zones humides intermédiaires entre la terre ferme et l'eau, séparant d'un côté un domaine fluvio-maritime profond et, de l'autre, un domaine terrestre devenu non inondable. Les marais riverains ont souvent été remblayés avec les produits de dragage du chenal navigable. Des quais portuaires ont fixé de façon rigide le contact entre la terre et l'eau. La pulsation liée à la marée s'y exprime désormais plus par une simple variation du niveau de l'eau le long des quais que par une variation périodique des étendues submergées.

Par ailleurs, des industries ont empiété sur des zones humides, comme à Hambourg, en Allemagne, où les rives de l'Elbe ont accueilli usines et installations portuaires. L'extension urbaine des villes littorales se fait aussi souvent aux dépens des zones humides longtemps laissées inhabitées, et la construction de réseaux routiers et ferroviaires a encore morcelé les zones humides restantes. Depuis une quarantaine d'années, par exemple, l'étalement de la Nouvelle-Orléans, aux États-Unis, est sans commune mesure avec l'accroissement très limité de sa population. Cet étalement



s'est fait sur les marais du delta du Mississippi, qui ont été endigués et drainés pour permettre l'extension de l'agglomération. Cette politique urbaine a d'ailleurs contribué à accroître les dommages provoqués, en août 2005, par la tempête Katrina.

Avec les progrès de la démoüstication, les terres littorales sont aussi devenues le nouvel eldorado du secteur touristique. Les lotissements balnéaires et le terrain de camping de La Faute, en Vendée, ont été construits sur une zone humide constituée d'anciens prés salés submersibles, qui étaient inhabités avant qu'une digue ne les protège, assez mal d'ailleurs comme l'a montré la tempête Xynthia.

Dans les régions tropicales, enfin, nombre de mangroves ont été dégradées par l'exploitation de leur bois comme combustible ou matériau. Elles ont aussi disparu sous l'effet des défrichements liés au développement des bassins d'élevage des crevettes et des poissons, notamment en Extrême-Orient, et reculé devant l'essor des villes et des installations touristiques. Selon l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, la superficie des mangroves dans le monde est passée de 19,8 millions d'hectares en 1980 à 15,2 millions en 2005.

Cette dégradation s'est accélérée au cours des 50 dernières années, en particulier aux États-Unis et en Europe : on estime par exemple que de 1960 à 1990, la superficie des zones humides françaises a été

divisée par deux. La destruction accélérée de ces milieux a provoqué une prise de conscience du désastre écologique qu'elle engendrait.

Des écosystèmes riches et fragiles

On a mis en évidence des interactions entre milieux terrestres et aquatiques, et constaté par exemple que les prés salés, dont la productivité biologique est l'une des plus élevées sur notre planète, sont une des sources capitales de la richesse des eaux littorales. Leur destruction brise les chaînes alimentaires complexes de ces milieux amphibies. Elle entrave le déroulement des cycles biologiques de nombreuses espèces de batraciens, de poissons, de crustacés, de mollusques et d'oiseaux. Ces cycles exigent en effet, pour la plupart, des passages dans des sites différents, mais associés : zones de nourricerie, zones de croissance, zones de reproduction, zones de préparation physiologique à la migration.

La biodiversité des zones humides littorales a d'abord été reconnue pour leur richesse ornithologique. D'innombrables oiseaux sédentaires occupent ces milieux privilégiés, et beaucoup d'oiseaux migrants s'y arrêtent dans leurs parcours. On s'est vite aperçu que l'avifaune n'était qu'un maillon d'écosystèmes complexes faisant intervenir nombres d'autres embranchements du monde vivant.

L'AUTEUR



Fernand VERGER est professeur émérite à l'École normale supérieure, à Paris, et conseiller scientifique du Conservatoire du littoral.

✓ À ÉCOUTER

Jeudi 8 décembre 2011, Fernand Verger sera l'invité de la partie « Actualités » de l'émission **La marche des sciences**, sur *France Culture* de 14h à 15h.
www.franceculture.com

✓ BIBLIOGRAPHIE

G. M. E. Perillo *et al.*, **Coastal Wetlands, An Integrated Ecosystem Approach**, Elsevier, 2009.

F. Verger, **Zones humides du littoral français**, Belin, 2009.

É. Fustec, J.-Cl. Lefeuvre *et al.*, **Fonctions et valeurs des zones humides**, Dunod, 2000.



Fernand Verger

SALICORNE ET OBIONE de la pointe d'Arçay, en Vendée.



Fernand Verger

VASIÈRE de l'anse de l'Aiguillon, en Charente-Maritime, à marée basse.



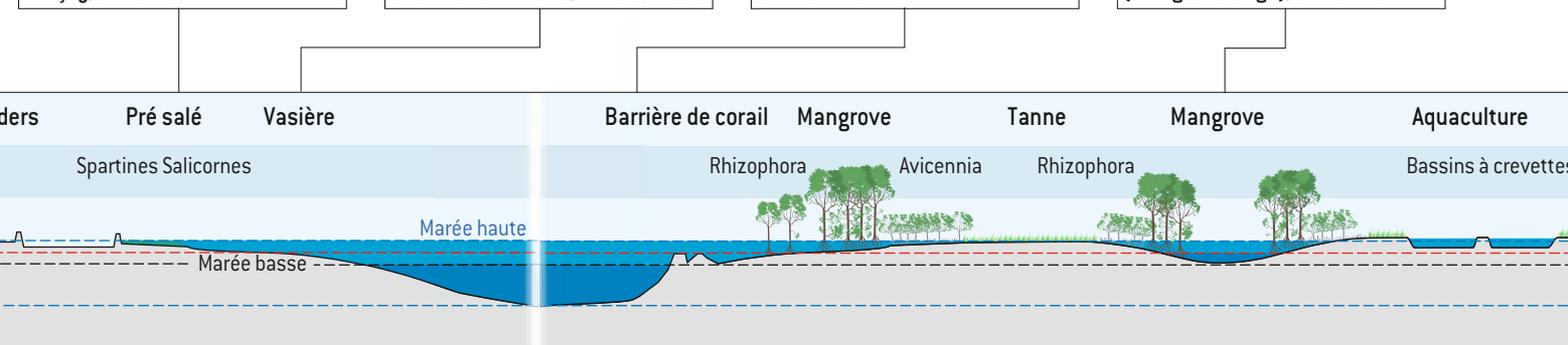
© Shutterstock/torino reaction

GRANDE BARRIÈRE DE CORAIL, en Australie.



© Shutterstock/Arto Hakola

MANGROVE RHIZOPHORA (mangrove rouge), en Floride.



Les zones humides présentant une gamme étendue de salinité, le règne végétal y est varié et original; les différentes salinités attirent aussi les poissons amphidromes tels les anguilles ou les saumons, qui doivent associer eaux douces et eaux salées afin d'accomplir leur cycle vital. Les zones humides offrent aux amphibiens un lieu où développer un stade métamorphosé terrestre après un stade larvaire aquatique. Les insectes y trouvent aussi un milieu propice (voire favorable à l'apiculture, dans les mangroves). Même certains mammifères y trouvent leur compte, tel le tigre du Bengale, repéré dans les fouillis inextricables des mangroves du delta du Gange.

La valeur économique des zones humides

Cette biodiversité des zones humides littorales nourrit des chaînes alimentaires très productives dans toutes les zones climatiques de la Terre. La productivité de la mangrove et celle des prés salés à Obione sont parmi les plus élevées de la planète: un hectare de mangrove représente 300 tonnes de matière organique sèche et en produit environ 15 par an. Exportée dans les eaux littorales, cette matière organique entretient la fertilité de ces milieux. La disparition des zones humides finit ainsi par nuire à l'économie en diminuant la richesse des eaux littorales, avec de lourdes conséquences sur la pêche côtière et la conchyliculture.

On a par exemple constaté que la séparation des cours fluviaux d'eau douce et des eaux marines par des barrages, qui a encore été très pratiquée après la Seconde Guerre mondiale, est préjudiciable à la biodiversité et à la productivité des estuaires. L'exemple du grand barrage du Brouwersdam sur l'Escaut oriental, aux Pays-Bas, est le plus représentatif d'une reconversion réussie.

Le barrage fut achevé en 1972 conformément au plan initial. Mais la séparation de l'hydrographie entre un domaine d'eaux douces et un domaine d'eaux salées provoqua l'appauvrissement de la biodiversité et la chute de l'économie des zones humides de l'estuaire. La prise de conscience de cette dégradation conduisit le gouvernement néerlandais à modifier dès 1974 le barrage primitif pour restaurer le libre mouvement des marées et donc la pénétration de l'eau salée dans

l'estuaire. Le barrage primitif a été transformé en un barrage antitempête comportant 62 vannes. Ouvertes en temps normal, ces vannes peuvent être temporairement fermées pour des raisons de sécurité, lorsque des tempêtes s'approchent des côtes de la Zélande. Des prés salés ont ainsi été préservés et la faune des estuaires a été conservée, à la satisfaction des pêcheurs, ostréiculteurs, écologistes et touristes.

Pendant longtemps, on s'est contenté de montrer l'intérêt qualitatif des zones humides en signalant leur rôle dans l'épuration des eaux, dans la sauvegarde des amphibiens, ou leur valeur paysagère. Depuis quelques années, on tente d'évaluer la valeur économique des services rendus par les écosystèmes des zones humides, afin de permettre une confrontation concrète avec les autres options d'utilisation de leurs sols, de leurs eaux et de leur biodiversité. On s'efforce même d'exprimer cette valeur en unités monétaires par hectare et par an.

Une des valeurs reconnues, bien que difficile à évaluer, est la valeur paysagère de ces zones humides littorales, qui associent l'attrait des surfaces immergées et émergées à la proximité du littoral. Cet attrait se manifeste en particulier chez les peintres, mais aussi dans la littérature. Parmi les écrivains, on peut citer la sensibilité particulière de Guy de Maupassant à ces paysages, quand il décrit les marais du delta de l'Argens, ou celle du poète américain Sidney Lanier, dans ses hymnes aux marais de Glynn, en Géorgie.

Cette valeur paysagère est un des éléments qui justifient la valeur touristique de ces zones humides. D'autres sont plus faciles à évaluer, comme les promenades en bateau dans la Venise Verte du fond du marais Poitevin, un dédale de canaux reliés à la Sèvre Niortaise, ou la visite du parc américain des Everglades, en Floride, ou encore les activités de chasse, de pêche professionnelle ou de loisirs pratiquées en ces lieux.

L'apport économique de la biodiversité peut aussi donner lieu à une évaluation monétaire. En estimant la productivité de diverses zones humides littorales, des écologues leur ont attribué une valeur économique et sociale. Par exemple, un hectare de mangrove dans le golfe de Californie rapporterait quelque 27 000 euros par an, essentiellement sous forme de prises de poissons et de crabes, des espèces commer-

ciales dont le cycle de vie est lié à la présence des palétuviers.

On essaie aussi d'évaluer la valeur économique que représentent ces zones face au changement climatique et à l'élévation du niveau des mers associée. Les prés salés comme les mangroves atténuent les effets les plus dramatiques de ce phénomène. Même si les mangroves occupent en général des littoraux que ne battent pas les houles les plus violentes, et même si elles ne font que ralentir la progression de la houle sans pouvoir l'arrêter, on a reconnu, d'une part, leur rôle protecteur là où elles ont été préservées et, d'autre part, les dégâts liés à leur dégradation, aussi bien lors du tsunami de 2004 en Indonésie que lors du cyclone Nargis de 2008,

Chaque zone humide est un écosystème propre dont le fonctionnement dépend de nombreux paramètres (géomorphologie, hydrologie, sédiments, communautés biologiques, activités anthropiques...). Voici un aperçu de celui de l'anse de l'Aiguillon, à cheval sur la Vendée et la Charente-Maritime, tel qu'il a été décrit en 2006 par Delphine Degré au Centre de recherche sur les écosystèmes marins anthropisés de L'Houmeau (CNRS/IFREMER/Université de La Rochelle). L'anse de l'Aiguillon forme la partie résiduelle de l'ancien golfe marin des Pictons aujourd'hui occupé par le marais Poitevin. C'est une vasière soumise aux marées, où se déversent plusieurs cours d'eau, dont la Sèvre Niortaise.

Ces caractéristiques en font un milieu estuarien avec peu d'espèces, mais généralement très abondantes. L'anse constitue notamment un lieu de passage et de nourrissage pour les poissons (mulets), d'hivernage pour les oiseaux (bécasseaux variables), une nurserie pour les jeunes poissons (soles) et un habitat à l'année pour tous les invertébrés comme les crustacés (*Carinus maenas*, *Corophium volutator*, voir ci-contre). Profitant des apports estuariens réguliers en nutriments, elle est particulièrement riche en microalgues (ou microphytobenthos, tel *Rhaphoneis amphicerus*) et en phytoplancton (*Chaetoceros decipiens*), qui alimentent à la fois les chaînes alimentaires de l'eau (pélagiques) – mésozooplankton (copépodes), poissons – et celles du fond (benthiques) – microfaune (foraminifères), bivalves (*Scrobicularia plana*), gastéropodes (*Hydrobia ulvae*) et annélides (*Hediste diversicolor*).

L'anse reçoit aussi beaucoup de détritus organiques des océans (et un peu des rivières) qui constituent, avec les détritus produits par tous les organismes vivants du milieu, un autre aliment de base de nombreuses chaînes alimentaires. Notamment, les mollusques cultivés sur place (huîtres *Crassostrea gigas* et moules *Mytilus edulis*) et les poissons comme les mulets se nourrissent de ces détritus.

notamment dans le delta de l'Irrawaddi, en Birmanie. Les racines échasses des palétuviers rouges (*Rhizophora*) et les pneumatophores des palétuviers blancs (*Avicennia*), par leur densité et leur profonde insertion dans la vase, amortissent fortement les vagues, notamment les plus violentes qui peuvent atteindre ces côtes en cas de tempête. La végétation des prés salés des latitudes moyennes (salicornes, spartines, obiones, puccinellies...) a un effet comparable, bien que beaucoup plus faible. Par leur présence, ces formations végétales – prés salés ou mangroves –, en favorisant la sédimentation, provoquent une élévation du niveau du sol, ce qui est aussi propice à une meilleure défense contre la mer. La man-

grove joue en outre un rôle important dans le stockage du dioxyde de carbone, que l'on cherche aussi à évaluer.

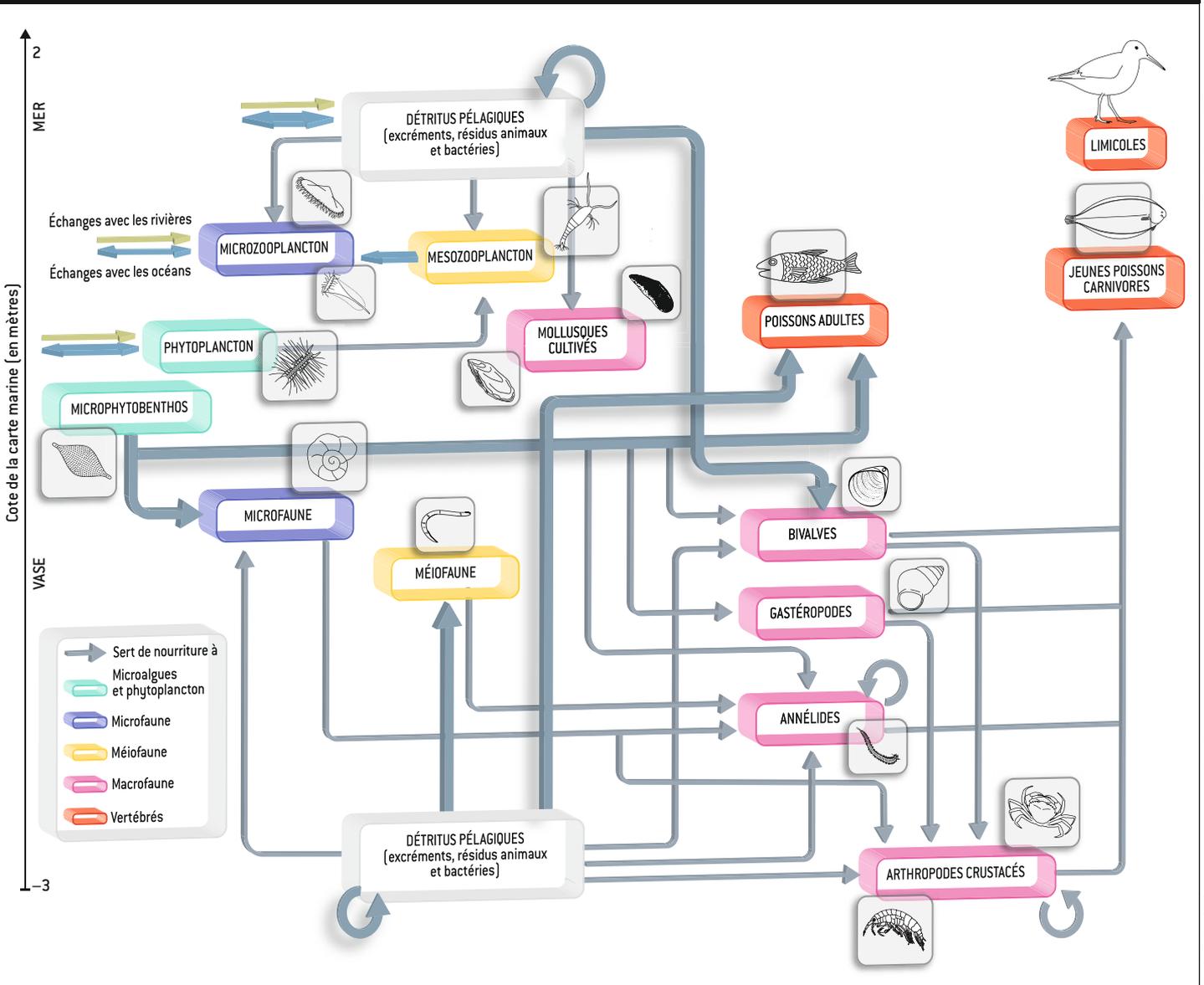
La prise de conscience de cette dégradation a suscité dans le monde une série d'acquisitions, de recommandations, de mesures législatives et réglementaires, destinées à protéger les zones humides restantes, voire à restaurer celles qui avaient disparu. Ces mesures concernent les unes, les zones humides, les autres, le littoral; estuaires, deltas, lagunes, marais et mangroves se trouvent à l'intersection des deux domaines.

Les protecteurs de l'avifaune ont joué un rôle pionnier dans cette action. En France, la Ligue de protection des oiseaux, créée dès 1912, s'intéressa très tôt à la sau-

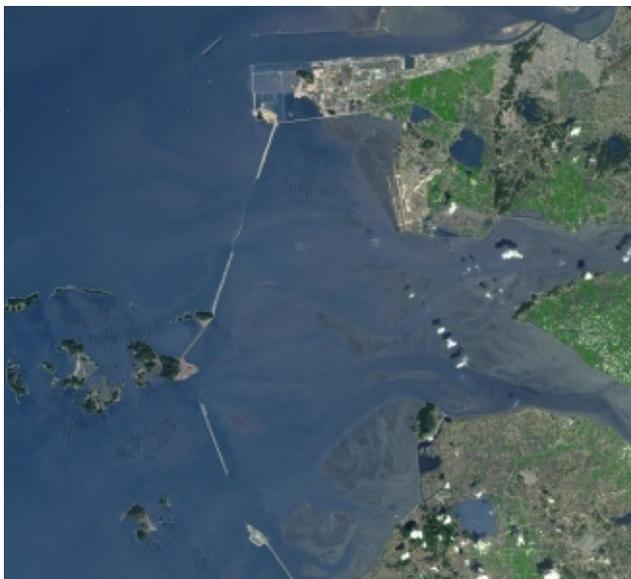
vegarde des zones humides par l'acquisition et la gestion de parcelles fréquentées par les oiseaux migrateurs. Ainsi, c'est à partir de l'action de Luc Hoffmann, un passionné d'ornithologie qui acheta en 1947 le domaine de la Tour du Valat, en Camargue, et entreprit des opérations de baguage des oiseaux migrateurs, que se développèrent des actions de protection des zones humides du delta du Rhône, puis de l'ensemble du monde méditerranéen.

Aux États-Unis, l'organisation privée *Ducks Unlimited*, créée à l'origine pour préserver l'habitat de la sauvagine, a entrepris ensuite de sauvegarder les zones humides. Au Royaume-Uni, l'organisation *International Wildfowl Inquiry*, fondée

L'ÉCOSYSTÈME DES VASIÈRES DE L'ANSE DE L'AIGUILLON



D'après D. Degré. Réseau trophique de l'anse de l'Aiguillon : dynamique et structure spatiale de la macrofaune et des limicoles hivernants... thèse de doctorat sous la direction de Pierre-Guy Sauriau, 2006



3. EN CORÉE DU SUD, la plus longue digue du monde – 33,9 kilomètres – a été achevée en 2010 dans la baie de Saemangum (à gauche, la baie en mars 2001, à droite en octobre 2006). Cette digue devrait soustraire à la

mer plus de 400 kilomètres carrés de terres en asséchant ses zones humides. Elle voue leur écosystème à disparaître d'ici quelques années, privant des milliers d'oiseaux migrateurs d'une étape majeure.

en 1954, avait pour objectif la protection des oiseaux aquatiques. En 1995, elle s'est regroupée avec d'autres associations pour constituer *Wetlands International*, une organisation à but non lucratif qui s'intéresse à la protection et à la gestion durable des zones humides.

On assiste à partir des années 1960 à une modification radicale de la perception sociale des zones humides littorales sous l'effet de l'augmentation des préoccupations écologistes et de la prise de conscience de la valeur biologique, patrimoniale, paysagère et économique de ces milieux. Devant la dégradation des zones humides qui servaient d'habitats aux oiseaux d'eau migrateurs, un traité intergouvernemental, nommé Convention de Ramsar du nom de la ville iranienne où il a été signé en 1971, sert de cadre à l'action nationale et à la coopération internationale pour la conservation et l'utilisation rationnelle des zones humides et de leurs ressources.

Protéger les zones humides

Entrée en vigueur en 1975, cette convention est le seul traité mondial environnemental qui porte sur un écosystème particulier. Elle adopte une définition large des zones humides, qui déborde le domaine littoral, et préconise leur inventaire dans tous les pays. Elle s'efforce aussi d'en faire connaître les services écosystémiques et d'y promouvoir un tourisme durable.

Dans le sillage de cette convention, diverses mesures de protection ont été prises. En Europe, par exemple, la directive *Oiseaux* de 1979 vise à protéger et à conserver à long terme les espèces d'oiseaux vivant à l'état sauvage sur le territoire des États membres. Ceux-ci s'engagent à préserver, maintenir ou rétablir les biotopes et les habitats de ces oiseaux – habitats qui, pour beaucoup, sont dans les zones humides littorales. La directive *Habitats Faune Flore* de 1992, quant à elle, promet, au sein des États européens, la protection et la gestion raisonnée des espaces naturels et des espèces de faune et de flore à valeur patrimoniale. Les zones humides occupent une large place parmi les sites protégés, rassemblés sous le nom de réseau *Natura 2000*. Le pâturage sur prairies humides a ainsi pu être encouragé par des mesures fiscales et des aides aux agriculteurs.

Plusieurs mesures ont aussi été prises à l'échelle nationale, telle la loi sur la protection de la nature du 10 juillet 1976. Et depuis 1975, le Conservatoire du littoral achète des terrains dont il confie la gestion à des associations, à des collectivités ou à des exploitants selon des plans de gestion durable qui ont notamment permis sur plusieurs zones de substituer, à la culture céréalière sur sols drainés, un élevage sur prairies humides.

Aujourd'hui, l'importance des zones humides littorales n'est plus à démontrer. Nombre d'entre elles figurent sur la liste du patrimoine naturel mondial de l'UNESCO,

telles que la mer des Wadden en Allemagne et aux Pays-Bas, le Parc national de Doñana en Espagne, le Delta du Danube en Roumanie, la baie du Mont-Saint-Michel, les Sundarbans dans le delta du Gange et du Brahmapoutre en Inde et au Bangladesh, la Grande Barrière de Corail en Australie, le Parc national des oiseaux du Djoudj, au Sénégal, ou encore le Parc national du banc d'Arguin, en Mauritanie. Les zones humides littorales constituent le lieu d'une respiration entre la terre et la mer que l'artificialisation accélérée des côtes a contribué à entraver. De l'excès même de ce mouvement sont nées des préoccupations écologiques qui, soulignant la valeur des zones humides, ont suscité un intérêt scientifique et provoqué des dispositions législatives tendant à les protéger.

Ces dispositions sont particulièrement opportunes alors que le changement climatique rend capital le rôle des zones humides littorales pour le stockage du carbone, pour le maintien de la biodiversité et pour l'adaptation à l'élévation du niveau de la mer. Reste à savoir si elles seront suffisantes. Depuis quelques années, la Grande-Bretagne conduit une politique délibérée de « réaligement », qui consiste à conforter des digues de second rang avant d'ouvrir les digues de mer, comme à Freiston, sur les rives de la baie du Wash, en 2000-2002. Rendre des terres à la mer peut apparaître, dans certains cas, comme la façon la plus heureuse de s'adapter au changement climatique. ■



CHAQUE MOIS



CHAQUE TRIMESTRE

Retrouvez vos magazines en kiosque ou directement chez vous

POUR LA SCIENCE

La référence de l'actualité scientifique internationale



VERSION NUMÉRIQUE
en format PDF



APPLICATION

sur votre smartphone ou tablette



Retrouvez Pour la Science également sur :



WWW.POURLASCIENCE.FR

Comment se forment les sols

On croyait que les strates qui constituent les sols apparaissaient par réorganisation interne. Progressivement, il s'est confirmé qu'elles se créent par accumulation de résidus peu solubles issus de l'altération du socle rocheux, tandis que les fractions solubles sont emportées par l'eau.

Jean-Paul Legros

Connaissez-vous le tchernoziem ? C'est la terre noire russe, si réputée pour sa qualité. Or, entre 1873 et 1875, la sécheresse et la famine sévirent en Russie, malgré le tchernoziem... Vassili Dokoutchaev, un géologue de l'Université de Saint-Petersbourg, fut chargé d'enquêter pour comprendre comment utiliser les sols au mieux. En parcourant la Russie d'Europe, il remarqua que la nature d'un sol est liée à cinq facteurs seulement : le climat local, le relief environnant, son âge, les agents biologiques qu'il contient et la roche sous-jacente. La science des sols, ou pédologie (du grec *pedon* pour sol), était née, et Dokoutchaev introduisait enfin un point de vue scientifique sur la formation des sols, ou pédogenèse.

Comment se forme un sol ? D'où vient la grande variété des sols ? Nous allons voir que la pédogenèse consiste en une lente maturation chimique du socle rocheux, produisant en permanence des argiles, les substances caractéristiques des strates dont est constitué un sol. Auparavant, insistons sur l'apport de Dokoutchaev à la pédologie naissante.

La pédologie n'a que 100 ans

À l'époque de Dokoutchaev, on professait toujours en France que la nature du sol était seulement liée à celle de la roche sous-jacente. Ce point de vue simpliste faisait de la pédologie une sous-branche de la géologie : à telle roche correspondait tel sol... Comme Dokoutchaev et ses disciples publiaient aussi en français et en allemand, leurs idées gagnèrent vite l'Ouest. En 1900, ils vinrent à l'Exposition universelle de Paris, et ils avaient amené des échantillons de terre, dont un mètre cube de tchernoziem ! La transmission de leurs

idées se poursuivit après la révolution de 1917, car plusieurs élèves de Dokoutchaev fuirent la Russie.

Sous l'impulsion de l'école de Dokoutchaev, on se rendit vite compte que, sous l'influence du climat, les sols s'organisent sur les continents en grandes bandes alignées sur les parallèles. Il devenait aussi clair que les sols naissent, vieillissent et se dégradent avec le temps. On découvrait l'influence du relief : les pentes provoquent de nombreux transferts de matières solides, d'eau, de suspensions ou encore de substances dissoutes ; tout cela sculpte le paysage en permanence et recharge les sols. En plus de toutes ces constatations, on comprenait que le sol constitue une interface importante entre le monde minéral et le monde vivant.

Le sol joue en effet un rôle essentiel pour la vie et dans les activités humaines. Il est le support des plantes et la base de la production agricole. C'est aussi un milieu de vie. Ainsi, la masse de bactéries, vers et autres organismes qui vivent sous une prairie est supérieure à celle des vaches qui y pâturent ! Le sol filtre l'eau et stocke le carbone sous forme de matière organique avant de le restituer à l'atmosphère sous forme de dioxyde de carbone. L'effet de serre dépend donc intimement du fonctionnement des sols. L'homme tire aussi du sol l'essentiel des matériaux nécessaires pour ses constructions, et y enterre ses morts depuis toujours...

Étant donné le rôle important des sols, il est utile de les étudier, pour mieux les utiliser et protéger. Les partisans de la culture biologique veulent, par exemple, limiter la dispersion des pesticides et des engrais chimiques. Or, depuis les travaux de Liebig en 1840, on sait que les racines n'absorbent que les ions en solution. Les ions nécessaires au métabolisme des plantes (azote, phosphore, potassium principalement) sont rares dans le sol, de sorte qu'il faut en

ajouter, sous peine de revenir aux rendements de dix quintaux de blé par hectare et par an du milieu du XIX^e siècle...

Autre exemple : en Bretagne, l'élevage du porc est domageable pour les sols, car pour des raisons sanitaires, on donne à manger du cuivre et du zinc à ces animaux. Or ces deux métaux ne sont pas assimilés par les cochons et passent dans les lisiers, puis dans les terres agricoles où les déjections sont épandues. Là, les argiles du sol les bloquent et, décennie après décennie, ces métaux s'accumulent. Les Bretons devront un jour dépolluer leurs sols, car le cuivre à forte dose est toxique pour la végétation...

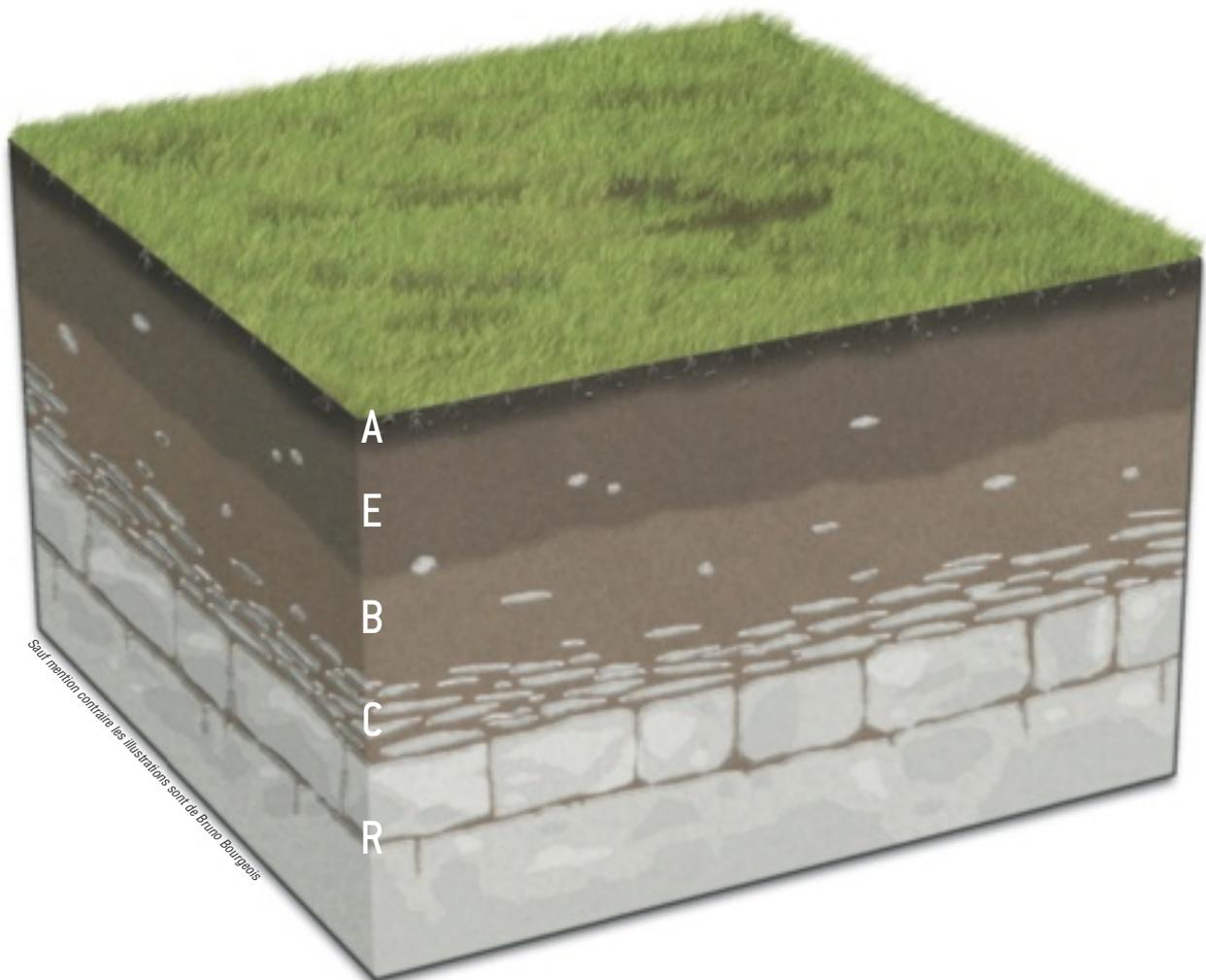
Des différences granulométriques

De quoi sont constitués les sols ? Physiquement, les sables, argiles, limons et autres débris de roche sont des mélanges caractérisés par leur granulométrie, c'est-à-dire par les tailles de leurs grains. Les grains des sables ont des tailles comprises entre 0,05 et 2 millimètres. Les particules d'argile mesurent moins de 0,002 millimètre. Les limons sont intermédiaires. Il existe dans la nature des sables purs, des

argiles pures, mais rarement des limons purs. Et à ces matériaux minéraux se mêlent des matières organiques.

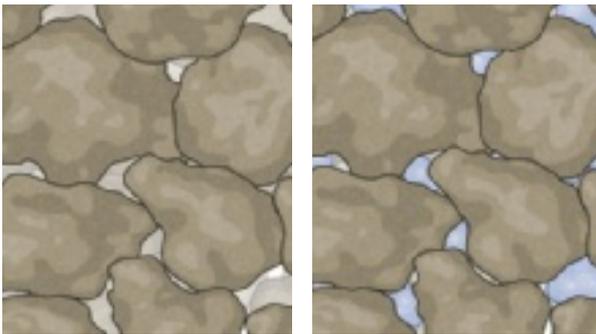
Tous ces constituants s'agglomèrent et forment des agrégats séparés par des vides plus ou moins gros. Ces interstices sont essentiels pour la vie des plantes puisqu'ils stockent l'eau (les racines boivent) et facilitent la circulation d'air dans le sol (les racines respirent). Un sol est un bon support pour la végétation quand il comprend, en volume, 40 à 50 pour cent de vide. Cela suppose des agrégats plutôt ronds. S'ils sont plutôt cubiques, ils créent des entassements très compacts (*voir les figures 2 et 3*). On distingue principalement les structures grumeleuses (agrégats millimétriques arrondis) et les structures prismatiques, cubiques ou polyédriques (agrégats centimétriques, voire décimétriques, et anguleux).

Les agrégats, l'eau et les vides du sol constituent le système eau-sol-air, qui doit bien fonctionner pour que les végétaux poussent correctement. Ce n'est pas le cas dans les sols imperméables, puisque l'eau de pluie y remplit toutes les cavités, asphyxiant les racines. Par manque d'air, les plantes jaunissent, et il faut alors drainer. Quand,



1. Les vieux sols sont un empilement d'horizons, c'est-à-dire de strates de compositions chimiques différentes. Sauf cas particulier, ces horizons sont nommés de haut en bas A, E, B, C et R. L'horizon A, en surface, est riche en matières organiques ; l'horizon E est éclairci et appauvri en certains éléments, qui abondent au contraire dans l'horizon

argileux B juste en dessous ; l'horizon C, dont la composition est proche de celle de la roche, est constitué des produits de la fragmentation, de l'arénisation (décomposition en sable) et de la transformation partielle en argile du matériau rocheux. Celui-ci constitue l'horizon R, le socle sous-jacent à tout type de sol.



2. Les sols poreux sont caractérisés par une structure grumeleuse (*ci-dessus à gauche*) avec de nombreux interstices entre les agrégats, que l'eau peut occuper (*ci-dessus à droite*). La taille des grumeaux peut aller de quelques millimètres à plus d'une dizaine de millimètres (*en haut*). Un sol convenant aux besoins de la végétation doit contenir entre 40 et 50 pour cent de vide, afin que les racines des végétaux puissent y trouver suffisamment d'air et d'eau.



3. Les sols peu poreux contiennent des agrégats cubiques ou prismatiques, qui se collent les uns aux autres en laissant peu de place entre eux à l'eau. Leur formation est favorisée par la présence massive d'argiles, qui changent de volume selon leur état d'hydratation. De tels sols contiennent donc peu d'air et conviennent mal à la végétation, sauf quelques plantes spécialisées, tels les joncs, les spaignes, etc.

au contraire, le sol ne contient pas assez de matériel fin, l'eau n'est pas retenue et percole ; l'air prend toute la place et, rapidement, les plantes ont soif. Il faut alors irriguer.

Sur le plan de la composition chimique, beaucoup de sols sont constitués de dérivés des silicates (les silicates, composés de la silice SiO_2 , représentent 97 pour cent de la croûte terrestre). Il existe de très nombreuses sortes de silicates. Certains sont issus directement de la roche sous-jacente, d'autres sont nouvellement formés au sein même du sol. Les argiles, qui jouent un très grand rôle dans les sols, ont les deux origines.

Une diversité née des silicates

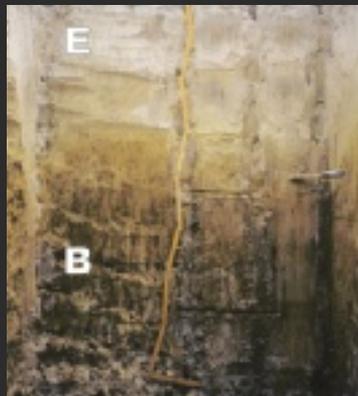
La diversité des silicates, à laquelle s'ajoutent les apports des autres minéraux, produit une énorme diversité de sols (*voir la figure 5*). Certains sont très calcaires et donc blancs. D'autres ne contiennent pas la moindre trace de carbonate de calcium (CaCO_3), même sur un socle calcaire ; c'est particulièrement le cas en climat humide, ce minéral étant relativement soluble dans l'eau. Ainsi, dans les Préalpes du Nord, le calcaire a complètement disparu des sols en quelques milliers d'années.

D'autres sols sont très riches en fer et sont, pour cette raison, rougeâtres. C'est le cas des « latérites » africaines, mais aussi de nombre de sols du Midi de la France. D'autres sont si chargés en matière organique qu'ils en deviennent noirs. Il faut donc abandonner l'idée que la terre est toujours de couleur marron et qu'elle est plutôt limoneuse (farineuse). Cela n'est vrai que pour une catégorie de sols, les « sols bruns » des vieilles classifications. Ces derniers sont certes abondants en Europe, mais sont absents dans la majeure partie du monde.

Comment distinguer les sols ? Il est nécessaire pour cela de creuser jusqu'à atteindre la roche non altérée, c'est-à-dire la roche mère, dont est issu le sol qui la recouvre. En France, il faudra creuser de un à trois mètres typiquement ; en Afrique, la roche inaltérée se situe souvent à 20 mètres de profondeur ou plus. Cette roche mère peut être dure (un calcaire, par exemple) ou meuble (un loess, c'est-à-dire un limon éolien). Et il n'est pas toujours facile de dire si l'on a affaire à une roche au sens strict (altération faible ou inexistante) ou à un sol, caractérisé par des agrégats typiques, des racines, la présence de matière organique et d'organismes vivants, et une eau constitutive en quantité appréciable.

Descendons maintenant dans le trou creusé et observons le « profil de sol ». Dans une plaine ou une région plate, on voit de haut en bas plusieurs couches successives et horizontales, se différenciant les unes des autres par leurs structures, leurs couleurs, leurs constituants. On les nomme horizons (*voir les figures 1 et 6*). Selon le registre de référence tenu par l'Organisation des Nations unies pour la nourriture et l'agriculture (FAO-WRB), il existe près de 40 types différents d'horizons, qui ont tous été finement étudiés. Ils se regroupent en horizons majeurs, empilés les uns sur les autres et désignés de haut en bas par les lettres A, E, B, C et R.

Situés en profondeur, les horizons C ont une composition et un aspect proches de ceux de la roche mère R. En prenant C pour référence, on constate que les horizons E (près de la surface), quand ils existent, sont appauvris en de nombreux constituants tels les argiles, le fer, le carbonate



4. Les profils de sol sont très variables. Ci-dessus, à gauche : un sol de montagne dans lequel on voit très nettement trois horizons reposant sur une roche mère située à seulement 50 centimètres de profondeur. La deuxième image montre un profil guyanais fréquent avec une couche E

blanchâtre et le début d'une couche argileuse B qui mesure plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. Le troisième cliché montre un sol de quelques centimètres seulement de profondeur. L'image de droite est au contraire celle d'un sol se développant sur plus de dix mètres de profondeur.

de calcium, etc., et que les horizons B (en milieu de profil) sont au contraire enrichis en ces constituants. L'objet de la pédogenèse est de comprendre par quels processus se produit cette différenciation verticale et de préciser comment ils se déroulent et en combien de temps.

La première chose à noter est que la différenciation verticale n'affecte que les vieux sols et pas les sols récents formés d'alluvions ou de dépôts de versant. Ensuite, la première explication qui vient à l'esprit est celle de transferts de matière depuis le haut vers le bas sous l'action de l'eau et de la gravité. Cette vision fut adoptée dès le milieu du XIX^e siècle, tant elle paraissait plausible (voir la figure 6, ancien modèle). Pour autant, les pédologues ont cherché tout au long du XX^e siècle à démontrer ces transferts sur de courtes distances verticales, sans bien y parvenir...

Une migration vers le bas ?

Explicitons cet ancien modèle dans le cas d'un luvisol. Dans ce « sol lessivé » des anciennes classifications, un horizon B particulièrement riche en argiles est surmonté d'un horizon E pauvre en argiles. L'argile était donc censée s'être déplacée verticalement depuis un horizon E, qui ainsi s'appauvrissait, pour aller enrichir un horizon B épais. De même, dans les podzols, sols qui se forment sur une roche mère siliceuse ou silicatée dans les climats humides et froids, l'ancien modèle suppose la migration vers le bas de la matière organique, du fer et de l'aluminium.

Or, dans la réalité, ces transferts de matières sont difficiles à établir. Une alternative au modèle dominant des « transferts descendants » a donc été progressivement mise au point par nombre de chercheurs (dont nous) : le modèle des « horizons cannibales ». On ne peut ici reprendre tous les arguments en sa faveur et prouver qu'elle s'applique bien à tous les types de sols. Nous allons simplement examiner une fois de plus le cas des luvisols, sols à horizon E pauvre en argiles surmontant un horizon B riche en argiles.

Ces sols constituent un cas d'étude particulièrement critique, car les argiles trouvées dans leurs horizons B riches en argiles semblent provenir de leurs horizons E supérieurs

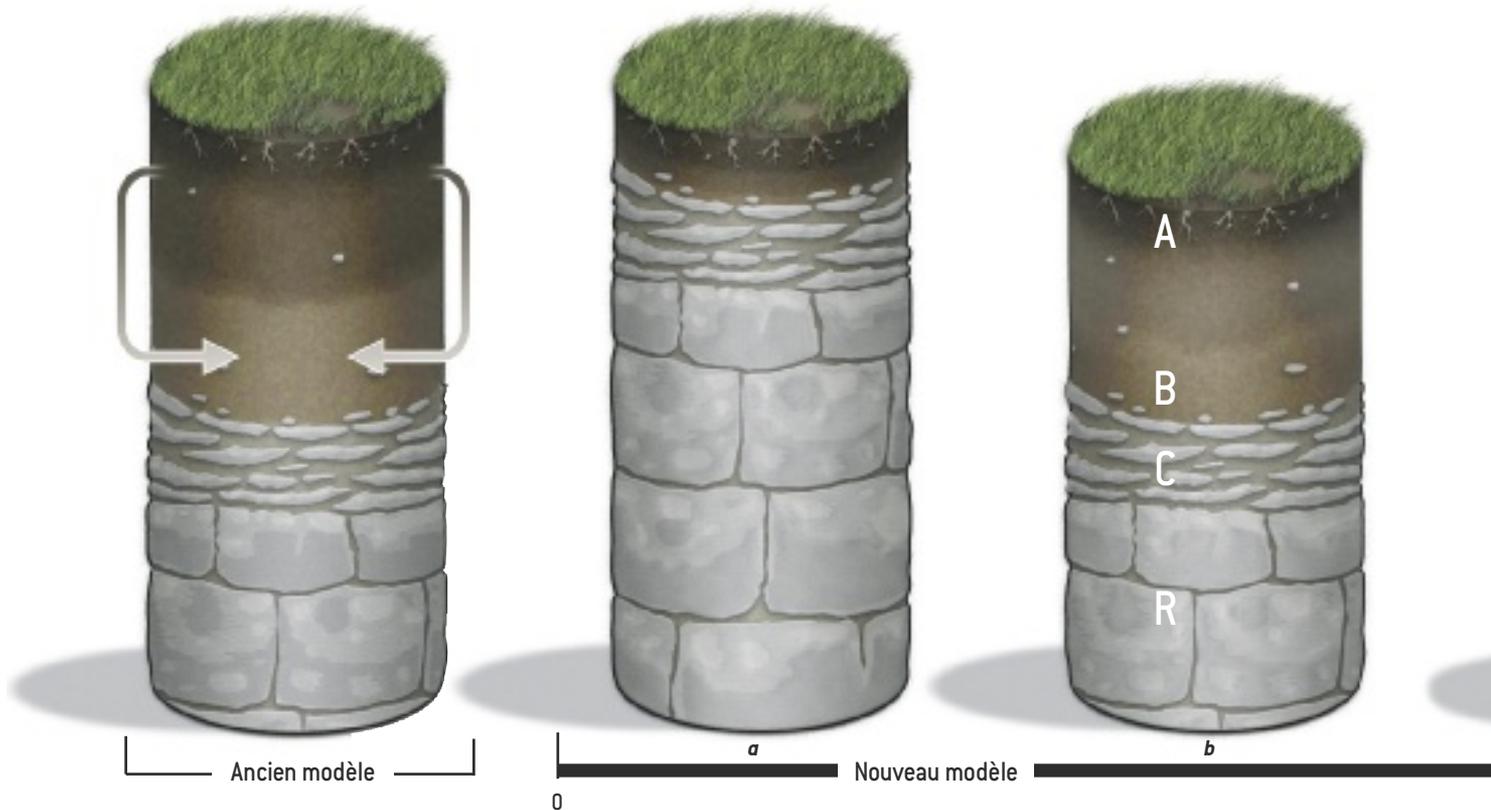
appauvris en argiles. Or les pédologues ont prouvé que ce n'est pas le cas. Comment ? Ils ont dosé des éléments à l'état de traces qui ont l'avantage de ne pas être mobiles (ils sont insolubles), et de ne pas entrer dans la composition de minéraux altérables : le zirconium et le titane. Quand la concentration en ces éléments double dans un horizon, cela signifie que cet horizon a perdu la moitié de sa masse ; si elle triple, qu'il a perdu les deux tiers de sa masse...

Il est ainsi apparu que l'accumulation d'argiles en B est majoritairement liée à leur formation *in situ*, au sein de cet horizon. Cette argile se forme lentement par altération des morceaux de roche mère, plus précisément par hydrolyse des minéraux silicatés dont elle est constituée. Rappelons que l'hydrolyse est la décomposition d'une substance par les ions H^+ et OH^- . L'hydrolyse des minéraux silicatés qui constituent la roche mère produit des ions emportés par l'eau et des argiles qui restent sur place. Notons au passage que l'activité biologique dans le sol contribue aussi à l'altération de la roche mère.

Puisque les argiles qui composent l'horizon B d'un luvisol sont produites sur place, comment s'explique l'appauvrissement de l'horizon E en argiles ? À la surface du



5. Ces quelques échantillons de sol ont été collectés à divers endroits en France, puis broyés et présentés dans des pots afin de comparer leurs couleurs. Une grande variété se manifeste déjà, sans toutefois représenter toute la panoplie des couleurs des sols de notre planète, dont certains sont rouge vif et d'autres bleu sombre.



6. La formation d'un luvisol selon l'ancien et le nouveau modèles.

D'après l'ancien modèle, des argiles produites en surface par la fragmentation et l'altération des matériaux sont transportées vers les horizons médians [B...]. Selon le nouveau modèle, l'altération du matériau en C, juste au-dessus de la roche, produit une première couche B riche en argiles (a, b, puis c). Cette couche argileuse est ensuite attaquée par les ions H^+ , en provenance de la surface, ce qui a pour effet sa destruction progressive par le haut et son remplacement par un horizon E pauvre en argile et souvent en fer, d'où sa couleur claire finale (de c à d). Le processus fonctionne en continu : C est attaqué par le haut à mesure qu'il se reforme par le bas ; la couche B s'épaissit par le bas, tandis que sa partie supérieure s'intègre à E. Ce dernier horizon finit par constituer une couche blanche d'épaisseur considérable, ce qui s'observe souvent en milieu tropical. Toutefois, le plus souvent, cette couche blanche est érodée par le haut si bien qu'au total, la surface descend. À l'issue du processus, qui dure quelque 100 000 ans, un luvisol est formé.

globe, les argiles sont certes bien plus stables que les roches dont elles sont issues, mais à la longue, même ces minéraux résistants finissent par se dissoudre. Les ions résultants sont emportés horizontalement par ruissellement ou verticalement par infiltration, phénomène qui n'entraîne pas d'accumulation d'argile en B, du moins en quantités notables. Ce mécanisme explique que la surface des très vieux sols, quel que soit leur type, est pauvre en argiles.

Des « horizons cannibales »

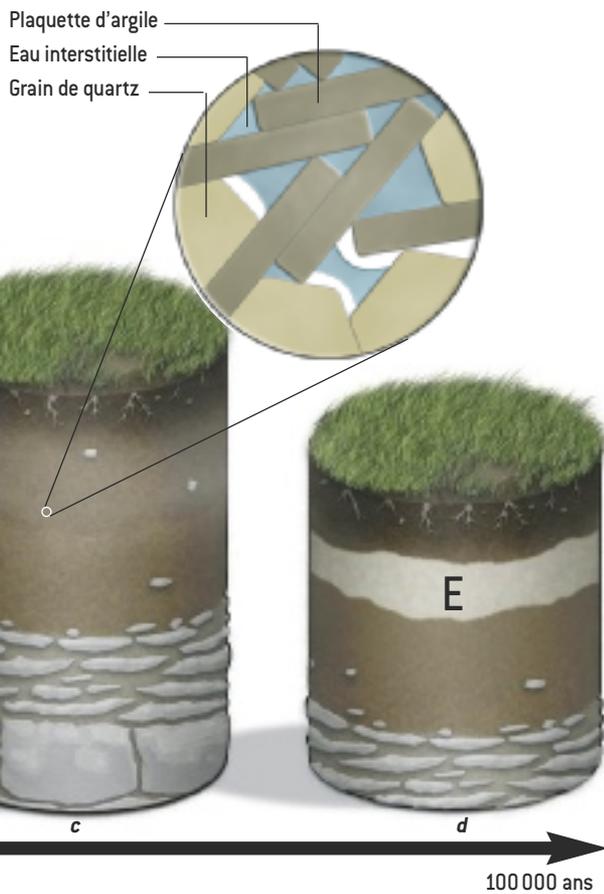
Sur le terrain, la formation de l'horizon E par dissolution des argiles est bien sûr imperceptible dans le temps. C'est dans l'espace qu'on observe une évolution. Les limites des différents horizons sont autant de fronts de transformation qui s'enfoncent lentement dans le sol. Progressivement, l'horizon B est remplacé dans sa partie supérieure par l'horizon E. Une image très simple rend compte de cette évolution : les horizons sont cannibales, au sens qu'ils semblent digé-

rer lentement l'horizon d'en dessous. Dans la réalité, ils descendent : ceux du haut en se vidant de leurs argiles par solubilisation, ceux du bas (B et C) en produisant de nouvelles argiles à partir de la roche mère fragmentée, puis altérée à cœur (voir la figure 6, nouveau modèle).

Ce grignotement progressif est un phénomène très lent, mais qui se traduit par de spectaculaires transformations granulométriques et minéralogiques. L'altération de plus en plus forte du socle rocheux vers la surface produit la série des horizons (voir les figures 2, 3, 4 et 6). Elle implique des pertes de matières considérables, représentant souvent beaucoup plus que le poids du sol qui reste en place ; celui-ci ne constitue finalement qu'un maigre résidu. Certes, le transfert vertical d'argile de E vers B existe. Il est parfois bien visible, mais c'est un épiphénomène et la mesure des éléments à l'état de traces, évoquée plus haut, prouve qu'il n'est pas le principal responsable du contraste granulométrique entre les horizons.

Le changement de point de vue sur la formation des sols impliquait de réexaminer la question de l'âge des sols, sur laquelle les pédologues du passé se sont beaucoup trompés. Grâce aux méthodes modernes de datation, les durées ont été revues à la hausse. Ainsi, les podzols n'ont pas l'âge des résineux qu'ils portent, mais ont 5000 ans ou plus. Quant aux luvisols, on a cru qu'ils étaient dus à l'action de l'homme, lorsqu'une forêt de feuillus est remplacée par une forêt de résineux ; en fait, ils ont 100 000 ans ou davantage. Enfin, les sols des pays chauds, connus sous le nom de latérites, sont incroyablement vieux : leur âge se compte en millions et parfois en dizaines de millions d'années.

Une nouvelle théorie n'est justifiée que si elle explique mieux les observations. Tel est bien le cas ici. Par exemple, il existe dans la nature de nombreux sols comportant un



horizon E aussi mince que B est épais, ou, à l'inverse, des sols comportant un E aussi épais que B est mince. Or l'ancien modèle peine à expliquer comment un horizon E mince parvient à « nourrir » un énorme B; de même, il explique mal comment un horizon E très épais produit un B très mince... Or le modèle des fronts de transformation explique facilement les deux types de sols: il fonctionne sans qu'il soit besoin de rechercher une relation entre les épaisseurs des horizons E et B.

Un modèle bien meilleur

Un important avantage du nouveau modèle est qu'il explique toute la variété des sols argileux. En effet, un unique couple de phénomènes, l'apparition de l'argile par altération des minéraux silicatés, puis sa lente disparition par dissolution, suffit à créer des sols comportant un horizon argileux seul (non encore dégradé), ou les deux types d'horizons superposés, ou encore un horizon appauvri seul, l'horizon B ayant totalement disparu, consommé par l'horizon E. Tout cela existe dans la nature.

Un autre fait, la subsidence des sols, est très bien expliqué par le nouveau modèle. On désigne ainsi la tendance des sols à s'effondrer sur eux-mêmes avec le temps. Cette subsidence peut être considérable: en Afrique, elle atteint jusqu'à 100 mètres pour des sols dont l'épaisseur résiduelle est encore de 15 mètres; dans la vallée du Rhône, les plus vieilles terrasses fluviales sont caractérisées par des subsidences presque comparables. Pour expliquer un tel phénomène, il faut envisager la disparition de 90 pour cent de la matière en haut du profil et non une simple réorganisation interne des matériaux selon la verticale. Ainsi, à l'échelle des temps géologiques, l'érosion chimique

sculpte les paysages. La forte érosion des montagnes mise à part, c'est ainsi que s'usent la plupart des roches, *via* la formation puis la lente solubilisation de leur pellicule superficielle d'altération: le sol. Les détails des phénomènes dépendent des climats.

Le nouveau modèle explique aussi l'enrichissement des sols en métaux. Les minéraux qui échappent à l'altération se concentrent en effet jusqu'à dix fois dans le résidu de sol conservé sur place, puisque, comme le prouvent les mesures d'éléments à l'état de traces, le sol résiduel représente environ dix pour cent de la masse initiale dans les sols tropicaux anciens. C'est pourquoi, en Afrique, en Guyane et ailleurs, on creuse la latérite pour y trouver l'or dont elle s'est enrichie. Mais cela n'est possible que si la roche sous-jacente contient déjà ce métal, au moins à faible concentration... Plus généralement, le fer (insoluble dans l'eau en milieu aéré), l'aluminium (quasi insoluble en toutes conditions), l'argile (peu altérable) s'accumulent longtemps dans les horizons B des sols avant d'être eux-mêmes éliminés. C'est ainsi que se forment les minerais de fer ou d'aluminium (bauxite).

Les sols constituent un capital naturel. L'homme doit en prendre soin, car, à l'échelle de son existence, il ne peut espérer les reconstruire. Divers chercheurs ont calculé la vitesse d'enfoncement à la base du sol, c'est-à-dire la vitesse d'altération de la roche. Tant dans les conditions tempérées que tropicales, on trouve le même ordre de grandeur: environ dix mètres par million d'années. Cela signifie que chaque année, la roche fournit, par altération, de l'ordre de 250 kilogrammes de sol par hectare. C'est donc la quantité de matière que l'on peut perdre par érosion en surface sans que le capital en terre ne se réduise dans le temps.

Or malheureusement, dans le bassin de Paris, sous culture, les quantités de terre érodée chaque année représentent plusieurs tonnes par hectare. En Afrique, il arrive même que l'on perde 200 tonnes par hectare et par an! Bien sûr, lorsque les manteaux d'altération sont épais, cet amoindrissement ne se perçoit pas à l'échelle d'une génération. Mais les sols méditerranéens, par exemple, ont beaucoup perdu en quelques milliers d'années. Devenus impropres à la culture, ils ont été abandonnés au maquis et à la garrigue. Force est de constater, que, dans la plupart des régions du monde, l'agriculture n'est pas complètement durable...

Jean-Paul LEGROS, ingénieur agronome, a suivi presque toute sa carrière à l'Institut national de la recherche agronomique (INRA) de Montpellier. Il est aujourd'hui président de l'Académie des sciences et lettres de Montpellier.

J.-P. LEGROS, *Les grands sols du Monde*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2007.

G. H. BRIMHALL et al., *Deformational mass transport and invasive processes in soil evolution*, in *Science*, vol. 255, p. 702, 1991.

J.-P. LEGROS, *L'évolution granulométrique au cours de la pédogenèse. Approche par simulation sur ordinateur. Application aux sols acides sur matériaux cristallins en zone tempérée*, Thèse d'État, Université de Montpellier, 1982.

G. MILLOT, *Les argiles*, in *Pour la Science*, n° 20, pp. 61-70, juin 1979.