

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.

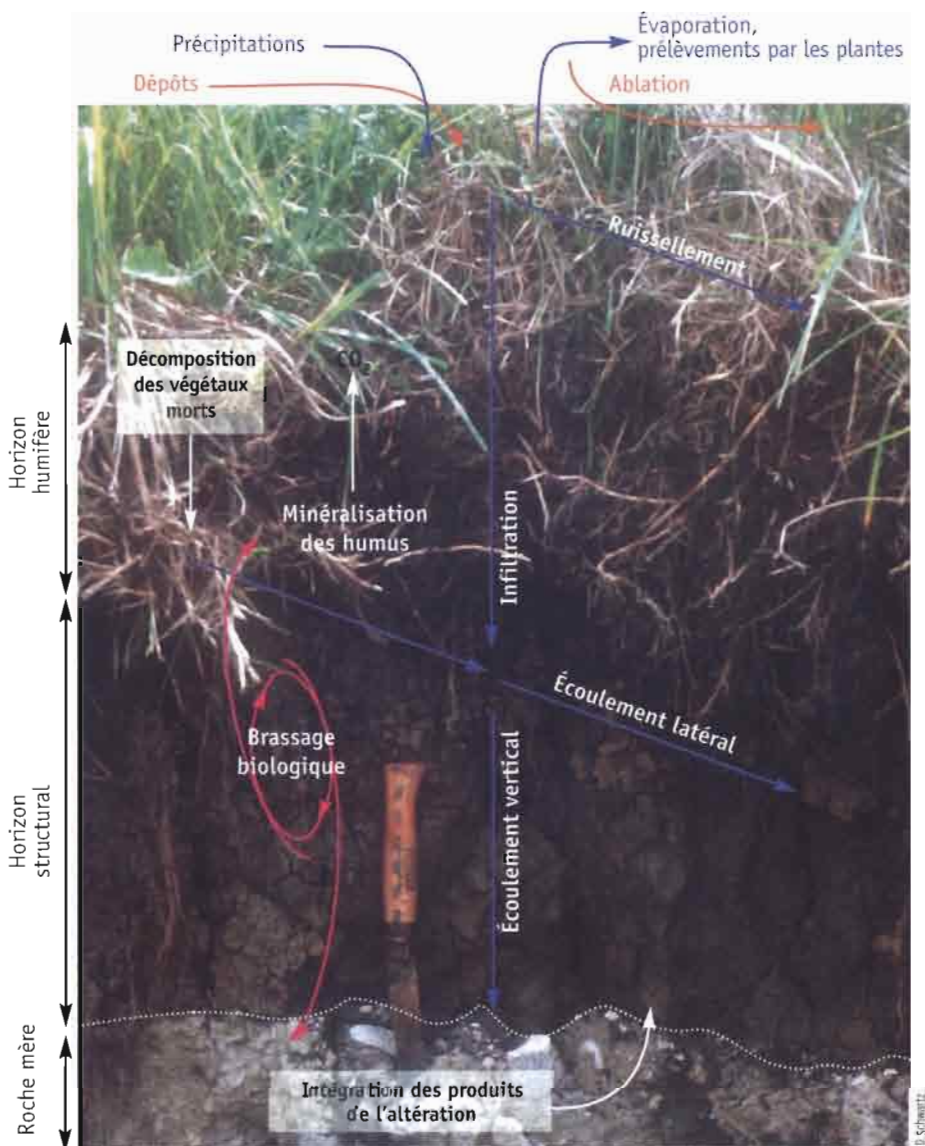
Quand on s'intéresse aux dynamiques récentes, c'est-à-dire s'étalant sur quelques années, les indicateurs sont légion, car ils résultent de mesures directes hydrologiques, climatiques, géochimiques... Dès que l'on atteint des durées séculaires, celles-ci sont plus rares : excepté les enregistrements 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}C 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}C 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.

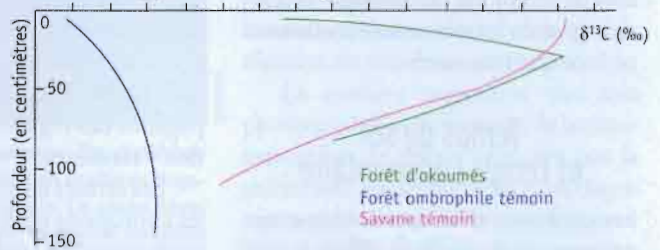
Cette convergence avec la stratigraphie est dangereuse, car elle est trompeuse : les horizons sont des unités d'isofonctionnement et non des unités chrono-stratigraphiques. Dans un sol, l'âge des matières organiques n'augmente pas avec le temps. Puisque les apports annuels et la minéralisation s'équilibrent,

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

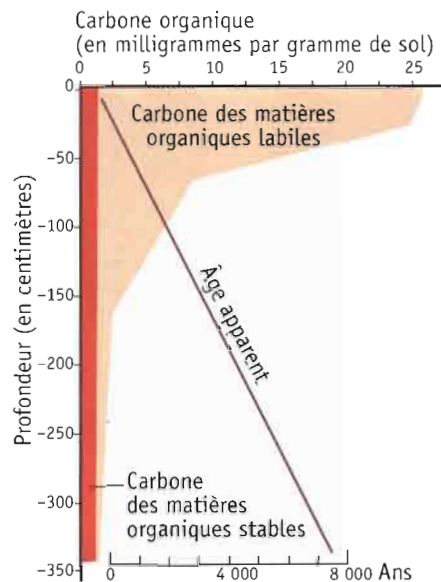
À partir des exemples précédents, on peut aborder de façon plus générale les rapports entre les temps inscrits dans les constituants pédologiques et l'information qu'ils fournissent sur l'environnement. Ainsi, les matières organiques constituent de bons indicateurs de l'évolution des végétations, mise 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'épaississement 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.