

CARNETS
DE
SCIENCES

La vie cachée des sols

Philippe Hinsinger

éditions
Quæ



Philippe Hinsinger

L'auteur

Directeur de recherche en écologie fonctionnelle, biogéochimie des sols et des agroécosystèmes à INRAE, **Philippe Hinsinger** étudie depuis plus de trente-cinq ans les interactions entre sols et racines, ainsi que leurs rôles dans la formation des sols et la nutrition des plantes.

Il s'est fortement impliqué dans l'édition scientifique (en particulier dans les revues *Plant and Soil*, et aujourd'hui, en tant qu'éditeur en chef, dans *Agronomy for Sustainable Development*), ainsi que dans la formation en écologie des sols. De 2018 à 2022, il a dirigé le département AgroEcoSystem d'INRAE en soutenant l'orientation des recherches du département vers la transition agroécologique des systèmes agricoles.

La collection *Carnets de sciences* s'adresse à un large public soucieux d'acquérir une culture scientifique. Ces ouvrages didactiques sont rédigés par des spécialistes reconnus qui se sont prêtés au jeu de la vulgarisation pour nous faire découvrir le monde qui nous entoure.

En première de couverture :

Le bousier (*Onthophagus gazella*) intervient dans la première étape de la décomposition des déjections des grands herbivores.

La vie cachée des sols

Philippe Hinsinger

**Parus aux Éditions Quæ
sur des thématiques proches**

Sols urbains, environnement et santé – Repenser les usages

Ronald Chauvet, Christian Mougín, Elisabeth Rémy, coord.

2024, 316 p.

Plaidoyer pour les tourbières

Hervé Cubizolle

2024, 176 p.

Désertification et changement climatique, un même combat ?

Bernard Bonnet, Jean-Luc Chotte, Pierre Hiernaux, Alexandre Ickowicz, Maud Loireau, coord.

Coll. Enjeux sciences, 2024, 128 p.

80 clés pour comprendre les sols

Jérôme Balesdent, Etienne Dambrine et Jean-Claude Fardeau

Coll. Quæ en poche, 2^e édition, 2023, 160 p.

Stocker du carbone dans les sols français

Sylvain Pellerin, Laure Bamière, Isabelle Savini, Olivier Réchauchère, coord.

Coll. Matière à débattre et à décider, 2021, 232 p.

Naissance et évolution des sols – La pédogenèse expliquée simplement

Denis Baize

2021, 160 p.

Éditions Quæ

RD 10

78026 Versailles Cedex

www.quae.com

© Éditions Quæ, 2024

ISBN (papier) : 978-2-7592-3897-2

ISBN (pdf) : 978-2-7592-3898-9

ISBN (ePub) : 978-2-7592-3899-6

ISSN : 2110-2228

Le code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction même partielle du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.



Un sol très différencié de type podzol, typique des milieux forestiers en climat froid et humide sur roche siliceuse (ici, des sables dunaires dans le nord de l'Allemagne). Ces conditions sont propices à l'accumulation d'humus en surface, surmontant une couche gris clair caractéristique, très appauvrie, et des couleurs bariolées en profondeur. Ce podzol a la particularité d'avoir été recouvert par un matériau dunaire plus récent : il témoigne d'un processus d'évolution complexe, en grande partie lié à la végétation et aux activités biologiques du sol.

SOMMAIRE

Avant-propos	6
Voyage au cœur de la terre, <i>terra incognita</i> sous nos pieds.....	6
Formation des sols : une histoire de Terre	9
Pionniers et colons : de la roche-mère à la terre nourricière.....	9
À la base, l'altération de la roche.....	11
Des racines et des sols.....	17
Des champignons mangeurs de cailloux.....	20
Des cailloux fabriqués par les organismes du sol.....	23
Fouisseurs et enfouisseurs : transferts d'eau, d'air... et de sol.....	26
Le sol en mouvement.....	30
Les ingénieurs du sol, artistes méconnus.....	34
Un formidable réservoir de biodiversité	41
Des chiffres qui donnent le tournis.....	41
Tant d'organismes, du micro au méga.....	44
Une surpopulation apparente.....	59
Points chauds et temps chauds.....	60
La diversité, une richesse inestimable.....	62
Le <i>world wide web</i> sous nos pieds !.....	63
Un monde souterrain communicant.....	64
L'alchimie du sol, la biogéochimie	71
Être (organique) ou ne pas être.....	71
Bactéries et archées à l'origine de grandes transformations.....	73
Vie de couple, ou plus si affinités.....	80
Acidification et salinisation, le goût de l'extrême.....	81
Redox Chili Peppers !.....	87
Quand les humains forcent la nature.....	93
Sols des villes et sols des champs : même combat.....	97

Le sol et ses habitants, maîtres du climat	109
Atmosphère, atmosphère I	109
Du carbone en stock	113
Planète bleue et eau verte : les plantes, moteur du système	117
Agents de circulation : vers de terre et racines	119
De l'eau, trop ou trop peu	121
Des gardiens de la végétation face à la désertification	126
La terre nourricière	129
Le sol, support de la vie sur Terre	129
Qualité du sol, qualité de la vie	131
Urbanisation et artificialisation	136
L'empreinte de l'agriculture	137
Retour à la terre et à ses valeurs... rêve d'agroécologie	139
Apprenons à connaître les sols et à les aimer...	147
Pour en savoir plus	150
Remerciements	151
Crédits iconographiques	152

AVANT-PROPOS

Voyage au cœur de la terre, *terra incognita* sous nos pieds

Les sols constituent la mince couche de matériau meuble à la surface des zones continentales qui forment les « terres émergées ». Leur épaisseur varie de quelques centimètres à plusieurs dizaines de mètres, mais est le plus souvent comprise entre quelques décimètres et moins de 10 mètres. Ils abritent une diversité insoupçonnée d'organismes vivants. Les sols et leurs habitants jouent des rôles clés dans le fonctionnement de nos écosystèmes et de notre planète tout entière ; ce n'est d'ailleurs pas pour rien qu'on l'appelle Terre !

Aujourd'hui, les sols sont menacés de toute part, qu'il s'agisse des sols des vastes espaces agricoles et forestiers que nous exploitons, ou des espaces encore qualifiés de « naturels ». Leur artificialisation est la conséquence directe d'une urbanisation galopante qui ne concerne pas que les pays dits « développés ». La reconnaissance récente de cette menace à l'échelle nationale fait de l'objectif « zéro artificialisation nette » un élément clé de la loi Climat et Résilience promulguée en août 2021. Pour autant, les sols font l'objet d'autres menaces, tout aussi insidieuses. Parmi elles, la pollution ne se restreint pas aux sols des zones urbaines ou industrielles. L'empreinte des activités humaines touche la totalité des sols de la planète : une récente expertise scientifique collective a montré une pollution par les pesticides de l'ensemble des écosystèmes terrestres, et de leurs sols.

Outre l'artificialisation et la pollution, l'acidification, la salinisation et l'érosion constituent d'autres menaces majeures. Il s'agit là de processus naturels d'évolution des sols que les activités humaines contribuent à accélérer. Ces processus chimiques et physiques, avec d'autres que nous découvrirons, placent les sols au cœur des grands cycles de l'eau, du carbone et de nombreux éléments clés pour la vie sur Terre. Les activités humaines ont irrémédiablement perturbé les cycles de certains d'entre eux, comme l'azote et le phosphore, au-delà des limites de l'acceptable pour notre planète. En dehors de leur rôle central dans ces cycles, les sols jouent

aussi sur la régulation du climat, et les organismes vivants qu'ils abritent en sont largement responsables.

Il est aujourd'hui admis que les sols constituent un des plus grands réservoirs de biodiversité de la planète. C'est une source d'espoir et d'inquiétude compte tenu de la forte réduction de la biodiversité induite par les activités humaines. Cet ouvrage s'attache précisément à mettre en lumière toute la richesse méconnue que recèlent les sols pour la biodiversité et les rôles de leurs multiples habitants dans le fonctionnement des écosystèmes terrestres.

Le sol, c'est aussi un espace foncier, une portion de territoire qui fait l'objet de différents usages et rend de multiples services, à commencer par l'essentiel de l'alimentation des populations humaines. De nombreux pays ont encadré le droit du sol, au sens juridique, de façons assez diversifiées. Ainsi, la France compte de nombreux propriétaires terriens, mais peu d'entre eux mesurent la richesse de leurs sols, ou les menaces qui pèsent sur leur santé, celle des sols en l'occurrence ! La prise de conscience croissante de ces menaces a amené l'Europe à élaborer en 2023 une réglementation, à l'instar de celle qui existe pour l'eau, autre bien commun. Les sols et les organismes vivants qu'ils hébergent reprendront-ils ainsi leurs droits ? Il est grand temps d'entamer un voyage exploratoire dans ce monde inconnu sous nos pieds !

Pièges en entonnoir formés de grains de sable construits par les larves de fourmilion, imitant les nids de fourmis pour les duper.





Turricules produits
par les déjections
de vers de terre.

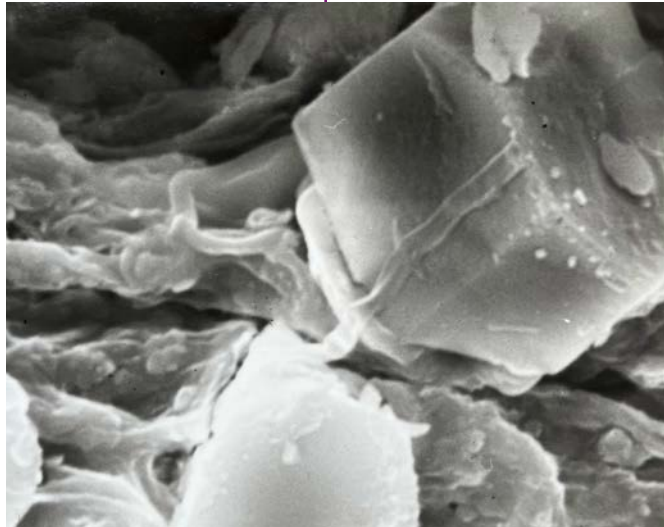
Formation des sols : une histoire de Terre

Les sols sont le produit de l'altération des roches sous l'effet du climat (précipitations et température) et des organismes vivants. Ils constituent un compartiment clé des écosystèmes terrestres et de la biosphère continentale, à l'interface avec la lithosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère et les écosystèmes aquatiques que cette dernière comprend. Les sols hébergent une très grande diversité d'organismes qui en conditionnent non seulement la formation, mais aussi le fonctionnement et l'évolution.

Hyphes de champignons colonisant des particules minérales dans le sol.

■ Pionniers et colons : de la roche-mère à la terre nourricière

Les roches constituent le matériau parental des sols ; le plus souvent, c'est à partir de la roche sous-jacente, à des profondeurs variables de la surface, que se forme le sol. On parle d'ailleurs de roche-mère. Dans les zones pentues, du fait de phénomènes d'érosion, voire de glissements de terrain, le sol peut se déplacer et ne plus se trouver à la verticale du matériau parental à partir duquel il s'est formé.





Les matières organiques, signes distinctifs du sol

Les débuts de la science du sol moderne, encore appelée « pédologie », du grec *pedon*, qui signifie « sol », et *logos*, qui signifie « étude », sont assez récents puisqu'on les situe en 1883, avec les travaux fondateurs du scientifique russe Vassili Dokoutchaïev. Celui-ci a mis en lumière la zonalité des grands types de sols sur la planète, qu'il a attribuée aux effets combinés de leurs facteurs de formation : roche, climat et végétation.



Sol superficiel sur roche calcaire en Champagne, très riche en matières organiques en surface, lui conférant une couleur brune caractéristique.

Il faudra quelques décennies de plus pour établir le rôle majeur des organismes du sol, des microorganismes à la faune, dans la formation et le fonctionnement des sols, aux côtés des végétaux. Ces derniers agissent en particulier à travers leurs systèmes racinaires ramifiés, colonisant parfois le sol sur toute sa profondeur, et même la roche sous-jacente. Mais comment distinguer la roche du sol, précisément ? En effet, pour le non-spécialiste, cette limite peut être subtile et quasi impossible à discerner à l'œil, même exercé, du pédologue. Eh bien, les sols se distinguent par trois grandes caractéristiques. Premièrement, ils présentent une structure, une organisation spatiale des particules qui les composent, qui leur est propre et qui diffère de celle des roches à partir desquelles ils se sont formés. Dans des sols formés sur des roches meubles comme les dunes de sable, cette distinction est quasi impossible à faire, cependant.

Deuxièmement, les sols contiennent des constituants minéraux différents de ceux des roches dont ils sont issus, notamment des minéraux secondaires comme les argiles (silicates d'aluminium ou de fer formant des feuillets plus ou moins ordonnés) ou les oxydes métalliques (d'aluminium ou de fer), qui sont le produit de l'altération des roches conduisant à la formation des sols : c'est la pédogenèse. Néanmoins, la plupart des roches sédimentaires contiennent des minéraux argileux (formés dans les sols qui ont donné les sédiments à l'origine de ces roches). Ceux-ci se retrouvent dans les sols qui se développent à leur surface, rendant ce critère distinctif parfois difficile à utiliser.

Enfin, la troisième caractéristique joue un rôle décisif pour faire la distinction entre sol et roche : contrairement aux roches, les sols contiennent une myriade d'organismes vivants et de matières organiques (composés carbonés riches en oxygène, en hydrogène et en divers nutriments, notamment azote et phosphore) qui en sont dérivées. Ces organismes constituent la part vivante des matières organiques du sol et régulent le devenir de ces constituants organiques, vivants et morts.



Observer ce qui se passe aux premiers stades de colonisation des roches peut aider à comprendre la formation des sols. C'est possible quand les roches sont fraîchement mises à nu, lors d'éruptions volcaniques ou du retrait des glaciers, un phénomène qui s'accroît aujourd'hui avec le changement climatique. Ces systèmes offrent parmi les plus belles et les plus instructives « chronoséquences », c'est-à-dire des séries de sols d'âges différents mais issus d'une même roche-mère ; ils permettent de reconstituer les séquences temporelles de formation des sols, les plus longues d'entre elles atteignant quelques millions d'années.

On peut aussi remonter l'horloge temporelle encore plus loin, afin d'essayer de comprendre comment s'est opérée la colonisation des continents par les organismes vivants et comment sont apparus les sols au cours des âges géologiques. C'est par ce voyage dans le temps et l'apparition de la vie sur Terre que nous vous proposons d'entamer notre périple, et la découverte de la vie sous terre.

■ À la base, l'altération de la roche

Ce sont principalement des lichens et des cyanobactéries qui jouent le rôle d'organismes pionniers susceptibles de coloniser la surface des affleurements rocheux. Ultérieurement, ceux-ci seront colonisés par les végétaux supérieurs, et se développera alors, très lentement, une fine pellicule superficielle pouvant être qualifiée de sol. Cyanobactéries et lichens ont en commun la capacité de fixer le carbone nécessaire à leur existence et à leur croissance à partir du dioxyde de carbone (CO_2) de l'atmosphère, au travers de la photosynthèse. Dans la longue histoire géologique et biogéochimique de la Terre, les cyanobactéries ont été les premiers êtres vivants, initialement dans les océans, puis sur les continents, à réaliser ce processus qui a profondément changé la face de la planète, notamment la composition de son atmosphère. La photosynthèse a ainsi produit le dioxygène (O_2) dont l'atmosphère était initialement dépourvue. Elle a aussi contribué à réduire fortement sa teneur en CO_2 .

LE SAVIEZ-VOUS ?

La vitesse de formation des sols varie considérablement, suivant la roche, le climat et l'activité des organismes vivants, mais elle est en moyenne de l'ordre du millimètre par siècle. Ainsi, pour qu'un sol atteigne une épaisseur d'un mètre, il faut environ cent mille ans.



Encroûtement biologique, lié à l'activité de cyanobactéries (*Nostoc*), à la surface d'un affleurement rocheux de type lapiaz.

Ces mêmes cyanobactéries sont aujourd'hui encore impliquées dans la formation d'encroûtements biologiques à la surface d'affleurements rocheux ou de roches meubles, telles que les étendues sableuses qui abondent en milieu désertique ou dans les dunes côtières. La photosynthèse leur permet d'injecter des substances organiques à la surface des matériaux rocheux. Ces encroûtements biologiques riches en matières organiques, vivantes et mortes, peuvent donc être considérés comme l'expression des tout premiers stades de formation des sols. Ils constituent les sols extrêmement superficiels des milieux les plus arides et peu propices à l'installation de végétaux supérieurs. Ces derniers jouent en revanche de multiples rôles clés dans la formation de sols profonds.

Dans un lichen, un champignon et un microorganisme photosynthétique (une cyanobactérie ou une algue microscopique) forment une association symbiotique. Le gros avantage de s'associer aux cyanobactéries, c'est qu'elles ont plusieurs cordes à leur arc ! Raison supplémentaire pour les reconnaître en tant que microorganismes de tout premier plan dans l'histoire

de la Terre... et de la terre. L'azote est un élément nécessaire à la vie qui n'est pas présent dans les roches, ou à l'état de traces, mais qui se trouve en abondance dans notre atmosphère : l'air que nous respirons aujourd'hui est composé à 80 % de diazote (N_2). Les cyanobactéries ont cette capacité rare chez les êtres vivants de réaliser la fixation biologique du diazote de l'air, c'est-à-dire la transformation de N_2 en ammonium (NH_4^+). Celui-ci entre dans la composition des acides aminés, qui sont eux-mêmes les briques indispensables à la formation des protéines, composés organiques azotés essentiels à la vie telle qu'on la connaît sur Terre.

Un gros avantage des cyanobactéries par rapport aux algues est donc leur faculté à fixer à la fois le CO_2 et le N_2 de l'air : un double intérêt pour le champignon qui s'y associe. Chez les lichens, le champignon apporte en contrepartie, à l'algue ou à la cyanobactérie associée, les éléments minéraux qu'il puise dans la roche.

Un cortège d'autres organismes peut s'accommoder de ces conditions extrêmes que constituent les affleurements rocheux, avant que l'on puisse parler de sol : il s'agit d'autres microorganismes, mais aussi de mousses et même de végétaux supérieurs comme des plantes carnivores. Celles-ci trouvent une source d'azote précieuse dans les proies qu'elles consomment, plutôt que *via* leurs racines ou par l'association avec des microorganismes



fixateurs d'azote. Ces conditions de milieu très contraignantes, par la faible disponibilité des nutriments et de l'eau, mais aussi les fortes fluctuations de température qu'elles occasionnent, font qu'aux premiers stades de leur développement, les sols se voient peuplés d'organismes vivants doués de capacités particulières pour faire face à ces stress.

Ce que nous apprennent les plus jeunes... et les plus anciens !

Les fronts des glaciers, les coulées de lave ou certaines formations dunaires constituent des situations privilégiées pour dater le début de la formation d'un sol : l'âge du sol correspond alors sensiblement à celui du matériau géologique dont il est issu. Les chronoséquences qui s'y rencontrent nous révèlent l'évolution temporelle des propriétés des sols et les processus qui gouvernent la pédogenèse.



Un ohia'a, les pieds dans le cratère du volcan actif Kilauea à Hawaï (Big Island) ; les racines de cet arbuste endémique se fauillent dans la roche à la faveur de la moindre fissure. Un véritable laboratoire à ciel ouvert : des expériences de manipulations de ces écosystèmes y ont été conduites en faisant des apports de nutriments à ces plantes pionnières, en vue de cerner les contraintes auxquelles elles font face.

Les îles volcaniques de l'archipel d'Hawaï se sont formées sur un point chaud du Pacifique. Les volcans particulièrement actifs qui se situent sur la plus grande île de l'archipel, Big Island, sont à la verticale de ce point chaud. Cette île recèle ainsi des roches volcaniques datées de quelques mois à quelques années à peine, tant ces volcans sont généreux pour recouvrir régulièrement sa surface de nouvelles coulées de lave.

Volcans et glaciers à livre ouvert

Végétaux pionniers sur le front de retrait du glacier Blanc dans les Écrins (Hautes-Alpes) : un environnement minéral avec très peu de sol à ce stade.



Les volcans et les fronts de glaciers nous livrent de précieuses informations pour comprendre la formation des sols depuis les toutes premières étapes de la pédogenèse, une fois que les roches sont exposées aux conditions de la surface de la Terre et aux organismes vivants. Comme nous l'avons vu, les propriétés des sols évoluent considérablement avec le temps, en interaction avec la végétation — et un cortège d'êtres vivants — qui s'y installe. Ces organismes contribuent à l'enrichissement progressif du sol en matières organiques, et ainsi en carbone et en azote, mais aussi à leur acidification et à leur appauvrissement en nutriments contenus initialement dans la roche-mère.

Dans les différents sols de ces chronoséquences, des équipes d'écologues ont pu étudier, outre les séquences de végétation, les changements de communautés d'organismes qui s'opèrent au cours du temps. En Nouvelle-Zélande, la chronoséquence que représente le retrait du glacier François-Joseph montre que la biomasse microbienne suit sensiblement la même évolution temporelle que la biomasse végétale, avec une rapide augmentation au cours des premières dizaines, voire centaines d'années, suivie d'une relative stabilité. Les biomasses bactériennes et fongiques suivent une évolution identique, corrélée à l'accroissement rapide des teneurs du sol en carbone organique et en azote ; la proportion des champignons dans la biomasse microbienne tend à s'amplifier au cours du temps. Au sein de la faune du sol, les évolutions sont contrastées, certains groupes d'animaux, tels que les acariens, étant très abondants dans les sols les plus jeunes. La diversité de la faune

tend toutefois à augmenter avec l'âge du sol et à être maximale après quelques dizaines de milliers d'années.

Par la large gamme d'âges qu'elles couvrent, les chronoséquences d'Hawaï (5 millions d'années) et du glacier François-Joseph en Nouvelle-Zélande (120 000 ans) ont fait l'objet de nombreuses recherches. Elles ont aidé à comprendre l'histoire des sols, qui apparaît ici à livre ouvert, en quelque sorte. Des travaux en tout point similaires ont pu être conduits dans les Alpes sur des gammes d'âges plus étroites cependant (jusqu'à quelques milliers d'années). L'accélération du retrait de très nombreux glaciers sous l'effet du réchauffement climatique rapide actuel va multiplier ce type de terrains d'étude pour les chercheurs, loin de s'en réjouir pour autant !



Les autres îles de l'archipel d'Hawaï se sont formées de la même manière que Big Island, mais se sont progressivement éloignées du point chaud à la faveur de la dérive des continents, par les mouvements de la plaque océanique qui les supporte. Les roches de ces îles sont donc de même origine et de même composition, mais portent des sols d'âges très différents, jusqu'à environ 5 millions d'années sur l'île la plus éloignée du point chaud. À ce titre, ce chapelet d'îles constitue la plus longue chronoséquence connue. Si elle a fait l'objet de nombreuses recherches, c'est aussi parce que les îles de cet archipel ont une végétation assez similaire. Plus particulièrement, elles accueillent toutes une espèce végétale endémique, l'ohi'a (*Metrosideros polymorpha*). Cet arbuste aux jolies fleurs rouges a la faculté de coloniser des coulées de lave solidifiée jusqu'au fond des cratères dans la partie la plus active du volcanisme hawaïen.

Une équipe américaine a eu l'idée géniale d'expérimenter des apports d'azote et de phosphore aux sols d'âges différents le long de cette chronoséquence et de mesurer la réponse des ohi'as à cette fertilisation. Ayant fourni de l'azote aux sols jeunes et constaté la croissance accrue des arbustes, ils ont pu montrer la pauvreté en azote de ces sols et écosystèmes jeunes. Cet élément est initialement quasi absent de la roche-mère, qui contient en revanche des quantités suffisantes de phosphore. Dans les écosystèmes et les sols les plus anciens de la chronoséquence, l'azote n'est plus limitant, mais c'est le phosphore qui le devient. Dans cet environnement tropical, les sols de l'île de Kauai, datés de 5 millions d'années, sont très altérés et appauvris en éléments nutritifs initialement présents dans la roche-mère, tels que le phosphore.

En France (Hexagone et Corse), nous ne disposons pas de chronoséquences aussi longues. Toutefois, les nombreux fronts de glaciers et les formations dunaires présents ont fait avancer notre connaissance de la pédogenèse en milieu tempéré, sur des pas de temps de quelques milliers d'années. L'île de la Réunion s'est, elle aussi, formée sur un point chaud, et l'archipel des Mascareignes, avec les îles Maurice et Rodrigues, comporte de multiples similitudes avec l'archipel hawaïen. Mais, bien que la Réunion compte deux volcans à l'instar de Big Island, elle n'a pas fait l'objet d'études similaires. Le plus élevé, le piton des Neiges, est éteint, tandis que le second est parmi les plus actifs du monde : le bien nommé piton de la Fournaise.

Le piton de la Fournaise, sur l'île de la Réunion, comprend dans sa caldeira un petit dôme volcanique actif (50 m de diamètre et 15 m de hauteur), formé il y a deux cent cinquante ans, dénommé « Formica Leo ». Ce nom vient de la ressemblance avec l'entonnoir construit par la larve du fourmilion (du même nom) à la surface du sol pour y piéger ses proies.





Archives terrestres, les paléosols

Heureusement, pour les pédologues, chaque sol peut faire l'objet de recherches passionnantes pour décrypter son histoire et les conditions de sa formation et de son évolution jusqu'à nos jours. En l'absence de chronoséquence, déterminer l'âge du sol est plus compliqué que dans les situations précédentes, car il ne correspond pas forcément à celui de la roche-mère sous-jacente. Au cours de son évolution, il développe progressivement des couches superposées, appelées « horizons », aux caractéristiques différenciées qui constituent, par leur empilement, le profil du sol. On peut les observer en creusant une fosse jusqu'au substratum géologique, qui peut atteindre jusqu'à plusieurs mètres ou dizaines de mètres de profondeur dans les sols les plus évolués.

Parfois, d'anciens sols ont été recouverts par des matériaux géologiques qui donnent ensuite naissance à de nouveaux sols superposés aux précédents, du fait de coulées volcaniques successives ou du déplacement de dunes, par exemple. Cela se produit également sur les sols de bas de pente en montagne, qui peuvent être recouverts par des éboulis donnant progressivement lieu à la formation d'un nouveau sol. Ces anciens sols, ou paléosols, sont une autre source précieuse d'informations pour le pédologue. Ils constituent des sols « fossilisés » susceptibles de contenir de multiples indices sur leur propre histoire, voire sur celle de la Terre... Les plus anciens – certains d'entre eux ayant été datés de près d'un demi-milliard d'années – ont permis de réaliser de formidables excursions à travers les ères géologiques, et de constituer les archives rares des premiers pas de la vie continentale sur Terre.

La dune du Pilat porte de nombreuses traces d'horizons organiques développés en surface sous les pinèdes voisines et déplacés par le vent, formant un paléosol complexe, en mille-feuille !





■ Des racines et des sols

Sans les racines des végétaux supérieurs, il n'y aurait sans doute pas de sols, ou plus exactement pas de sols profonds comme ceux qui dominent de très nombreux écosystèmes terrestres. En effet, *a contrario*, dans les zones désertiques peu propices au développement d'un couvert végétal dense, les sols sont superficiels. Ils contiennent très peu de matières organiques, excepté dans les encroûtements biologiques éventuellement présents à leur surface, ou au pied des touffes de végétation éparses.

C'est en premier lieu par la photosynthèse que les végétaux supérieurs jouent un rôle clé dans la formation des sols : ils sont la source majeure de carbone organique. Celui-ci fournit l'énergie à la base de la vie dans les sols et dans les écosystèmes terrestres. À la chute des feuilles, ou à la mort des parties aériennes des végétaux, le carbone organique qu'elles contiennent est restitué à la surface du sol. Quant aux racines, elles délivrent cette précieuse source d'énergie sur toute la profondeur du sol qu'elles colonisent.

Des biogéochimistes américains ont mis en évidence que, à la fin du Dévonien, il y a 370 à 350 millions d'années, l'avènement de plantes de grande taille a contribué à fortement diminuer la teneur en CO₂ de l'atmosphère : elle est alors passée d'environ 4 000 à 1 000 ppm (parties par million). Cela a été rendu possible par le développement d'espèces végétales présentant une capacité photosynthétique accrue et un système racinaire profond. Ces chercheurs ont également montré que cette période a coïncidé avec une augmentation de l'injection de carbone organique dans les écosystèmes terrestres et à une accélération des processus d'altération des roches. L'émergence de la végétation continentale a donc eu un impact majeur sur la composition de l'atmosphère terrestre et sur la biosphère tout entière, *via* la formation des sols de notre planète.

Approfondissons un peu ces histoires de racines

Les racines ont un rôle d'ancrage pour la végétation, et c'est ainsi qu'elles ont permis la colonisation des continents et des milieux terrestres par des végétaux de plus en plus imposants, et à plus forte capacité photosynthétique. On voit couramment dans la nature de petites touffes d'herbe ou de grands arbres s'installer dans les moindres anfractuosités des roches. Il en va de

Racines de chêne vert (*Quercus ilex*) s'insinuant dans les anfractuosités de roches au faciès gneissique dans le massif du Canigou, dans les Pyrénées-Orientales.





même dans les sols, dont elles utilisent la porosité. Elles ne se contentent pas de profiter des pores ou fissures préexistants dans les roches ou les sols. En cheminant dans le sol, elles favorisent la circulation de l'eau et de l'oxygène, mais aussi d'un cortège d'organismes du sol.

Nous verrons en outre que, grâce à leurs propriétés physiques, les racines permettent aussi de lutter contre l'érosion, processus naturel qui contribue à des pertes en grosses quantités de sols, entraînés vers l'aval ou dans les écosystèmes aquatiques. Enfin, la physiologie des racines se traduit par la mise en œuvre de processus chimiques que l'on ne soupçonne pas, mais qui sont essentiels pour l'acquisition de nutriments pour la plante. Ces processus contribuent significativement à l'altération des minéraux et à la formation des sols.

Empreinte en creux d'un système racinaire sur une plaque calcaire dans un sol de garrigue au nord de Montpellier : les racines ont induit une forte acidification dans leur voisinage immédiat, conduisant à la dissolution du carbonate de calcium contenu dans le calcaire.

Les racines qui raffolent des minéraux

En observant des organes aussi fragiles en apparence que les racines de végétaux, on ne soupçonne pas leur aptitude à modifier profondément leur environnement. Outre leurs effets mécaniques, elles sont capables d'altérer, par des processus chimiques, les roches et les minéraux qui constituent les sols : carbonates, phosphates ou silicates (argiles, feldspaths, micas ou quartz, notamment). Dès le XIX^e siècle, un chercheur allemand a observé, après avoir laissé pousser des plantules de haricot pendant quelques semaines au contact d'une plaque de roche calcaire, les empreintes en creux laissées par les racines à sa surface. Il attribua ce phénomène aux sécrétions acides des racines. De tels processus de dissolution sous l'effet acidifiant du système racinaire se produisent dans la nature, en particulier dans des sols développés sur calcaires durs.

Il a été montré en conditions de laboratoire que, au travers de ce même phénomène d'acidification par les racines, les plantes pouvaient dissoudre d'autres minéraux, réputés moins altérables que le carbonate de calcium des roches calcaires. C'est même pour elles un moyen de couvrir une partie de leurs besoins en nutriments comme le phosphore. La mobilisation par les racines d'autres nutriments (potassium, magnésium, fer) contenus dans des roches ou des minéraux silicatés a également été démontrée, alors que les scientifiques avaient longtemps pensé qu'ils étaient inaccessibles aux plantes.

