A large black silhouette of a tree with a person sitting at its base on a mound of earth. The tree's branches spread across the top half of the frame. The person is lying on their back, reading a book. The ground is a textured, brownish-grey mound.

MARC-ANDRÉ
SELOSSE

Illustrations d'Arnaud Rafaelian

L'ORIGINE DU MONDE

Une histoire naturelle du sol
à l'intention de ceux qui le piétinent

ACTES SUD

LE POINT DE VUE DES ÉDITEURS

Le sol est l'origine du monde, car il le porte, le nourrit et le protège.

Il est construit par sa biodiversité, qui représente 25 % des espèces connues. Il fourmille d'animaux et de microbes qui vivent et se nourrissent de façons incroyablement variées : cette diversité assure tout simplement... le fonctionnement des écosystèmes terrestres. Le sol fait aussi la fertilité des océans, régule le cours des rivières et modifie le climat. C'est une puissante et étonnante construction du monde vivant.

Hélas ! Méconnaissant le sol, qui nous paraît opaque et sale, nous l'avons endommagé depuis des millénaires. Urbanisation, agricultures inadaptées, salinisation, pollution... l'empêchent d'assurer ses services inestimables et il disparaît sous nos yeux par érosion. Marc-André Selosse nous invite à un magnifique périple souterrain, accessible à tous, entre les composants du sol et sa vie débordante. Il nous fait découvrir la partie souterraine et méconnue des plantes. Enfin, il conclut avec optimisme sur les gestes grâce auxquels nous transmettrons des sols intacts aux générations futures. Car ceux-ci peuvent devenir des outils de développement durable.

Avec sa façon habituelle et un brin d'humour dans l'illustration, l'auteur nous raconte simplement le sol et éclaire de nombreuses observations banales. En comprenant ce sol que nous piétons, nous retisserons notre lien perdu au monde naturel.

L'ORIGINE DU MONDE

MARC-ANDRÉ SELOSSE

Professeur du Muséum national d'Histoire naturelle, Marc-André Selosse enseigne dans plusieurs universités en France et à l'étranger. Ses recherches portent sur les associations à bénéfices mutuels (symbioses) impliquant des champignons, et ses enseignements, sur les microbes, l'écologie et l'évolution. Éditeur de revues scientifiques internationales et d'Espèces, une revue de vulgarisation dédiée aux sciences naturelles, il est aussi l'auteur, chez Actes Sud, de Jamais seul (2017) et de Les Goûts et les couleurs du monde (2019).

DU MÊME AUTEUR

LA SYMBIOSE. STRUCTURES ET FONCTIONS, RÔLE ÉCOLOGIQUE ET ÉVOLUTIF, Vuibert, 2000.

JAMAIS SEUL. CES MICROBES QUI CONSTRUISENT LES PLANTES, LES ANIMAUX ET LES CIVILISATIONS, Actes Sud, 2017.

LES GOÛTS ET LES COULEURS DU MONDE. UNE HISTOIRE NATURELLE DES TANNINS, DE L'ÉCOLOGIE À LA SANTÉ (avec des dessins d'Arnaud Rafaelian), Actes Sud, 2019.

PETITES HISTOIRES NATURELLES (avec des dessins d'Arnaud Rafaelian), Actes Sud, 2021.



Ce livre est recommandé par l'AFES, Association française pour l'étude des sols :



Illustrations de couverture : © Getty Images (haut) / Jérôme Poulenard (bas), 2021

© ACTES SUD, 2021

ISBN 978-2-330-15697-8

www.actes-sud.fr

MARC-ANDRÉ SELOSSE

L'ORIGINE DU MONDE

Une histoire naturelle du sol
à l'intention de ceux qui le piétinent

Illustrations d'Arnaud Rafaelian

ACTES SUD

*À Léon,
pour qui le monde commença
alors que j'écrivais ces lignes.
Car nulle œuvre n'égale,
mon fils aimé,
celle que fit ta mère.*

SOMMAIRE

Introduction. Balade en brun, aux abords de l'invisible.....	11
--	----

Acte I

L'âme des sols : les ingrédients d'un grand pot-pourri

I. Un dur au cœur tendre : de la fraction solide du sol	21
II. L'ambrosie souterraine : de la fraction liquide du sol.....	41
III. L'attachement du sol à la fertilité : des colloïdes du sol	67
IV. La vie palpitante du sol : du sol comme un écosystème.....	91
V. Le sol ne manque pas d'air : de l'atmosphère souterraine au climat....	119

Acte II

La dynamique des sols : quand le vivant façonne l'inerte

VI. Le sol, du berceau à la maturité : de la pédogenèse.....	149
VII. Le vaste pourrissoir : de la décomposition et de la minéralisation.....	175
VIII. Humus actif et humus fainéant : de la dynamique de la décomposition	205
IX. Faire fondre le cœur des pierres : de l'altération des roches.....	241
X. Les sols en mouvement : de la bioturbation à l'érosion.....	267

Acte III

Du sol à la plante : excursion souterraine dans la vie végétale

XI. Une mère à peine nourissante : de l'alimentation des plantes	305
XII. Contrariétés souterraines : du sol comme source d'agressions.....	335

XIII. Entraïdes souterraines : du sol comme source de symbioses	367
XIV. Les affronts faits au sol : de l'insulte à la réparation.....	405
Épilogue. De l'origine du monde à la fin des temps, une symphonie en sol majeur ?	443
Quelques lectures complémentaires	453
Glossaire	455
L'auteur.....	467
Remerciements	469

INTRODUCTION

BALADE EN BRUN, AUX ABORDS DE L'INVISIBLE

Où l'on découvre le compagnon invisible d'une possible randonnée ; où l'on baisse les yeux à terre et où l'on trouve cela un peu sale, alors que c'est absurde ; où l'auteur raconte une histoire... atterrante, au sens vrai ; où l'on fait moult promesses au lecteur, bien sûr ! Et comment s'enchaîneront les pages qui suivent.

ACCALMIE PLUVIEUSE ET POSSIBLE BALADE

Nous avons profité d'une accalmie : l'hiver était doux et très humide, et la journée avait commencé sous une pluie continue. Vers la fin de l'après-midi, le soleil pointant, nous avons enfilé les imperméables et mis les chaussures de marche pour une balade. Nous sortîmes de Rozay-en-Brie par la rue de la Poterie afin de gagner les champs alentour. Il planait dans l'atmosphère encore humide cette odeur d'après-pluie, dont un d'entre nous nous apprit qu'elle avait un nom : le pétrichor. Dans la douceur de l'hiver, les bords des chemins étaient très verts et contrastaient fortement avec le brun des champs. À la fin de l'automne, ils avaient été labourés et les mottes brunes, bien rangées par les traits du labour, couvraient les vastes étendues dans la plaine agricole de Brie. En bien d'autres régions de France, le brun des labours domine aussi le paysage en hiver...

Partout, les fossés étaient pleins d'eau qui s'écoulait doucement, colorée en ocre-brun par les sédiments arrachés aux champs. Arrivés au pont qui enjambe l'Yerres, nous fûmes étonnés du niveau qu'avait atteint la rivière, sous l'effet des pluies des derniers jours. Elle charriait une eau brunie par les sédiments. Les enfants qui ne se tenaient plus d'être enfin dehors couraient partout et ramenaient des mottes

de terre qu'ils jetaient depuis le pont pour rire des éclaboussures. Leur mère les calma sèchement : elle n'aimait pas qu'ils se salissent ainsi, nous expliqua-t-elle. Ils avaient déjà de la terre sur les vêtements ! Nous rentrâmes en traversant un petit bois tapissé de feuilles mortes, qui nous évita tout d'abord de salir trop nos chaussures mais, en reprenant la route, elles se souillèrent vite de la terre que l'eau avait entraînée des champs voisins. En arrivant à la maison, alors que la pluie recommençait à tomber, nous attendîmes chacun notre tour d'utiliser le décrotoir : comme devant beaucoup d'anciennes maisons, une lame de métal scellée près de l'entrée permet de gratter les semelles avant de franchir le seuil.

À l'intérieur, une bonne odeur de pot-au-feu flottait dans l'air, réconfortante après la balade humide qui nous avait refroidis. Il n'était pas question d'entamer le repas sans préparatifs appropriés : avec le maître des lieux, nous nous dirigeâmes vers la cave où se trouvait une belle collection de bouteilles aux âges respectables. Nous devions à la fois servir un blanc sur un saumon fumé de la Baltique, en entrée, et un rouge plus corsé sur le fameux pot-au-feu. La cave était légèrement en retrait de la maison mais un propriétaire du siècle dernier avait aménagé un appentis en torchis pour y accéder sans sortir du corps d'habitation, ce qui fut un confort agréable ce jour-là. En arrivant dans le vaste espace voûté, une forte odeur d'humidité et de terre nous saisit. Notre hôte était fier de la régularité de la température de sa cave, condition de bonne conservation de ses vins : 11 °C pratiquement toute l'année ! Nous remontâmes avec une sélection de vins : une agréable soirée s'annonçait, entre amis.

... Je ne suis jamais allé à Rozay-en-Brie, la ville bien réelle où cette histoire aurait pu avoir lieu, et je n'y ai pas encore d'amis. Si j'ai inventé ce scénario plausible, c'est parce qu'il est hanté de part en part du sujet de ce livre, dont le nom n'apparaît pourtant pas dans les lignes qui précèdent : le sol. Et s'il vous a paru invisible, c'est que vous-même vivez sans le savoir aux abords de ce compagnon omniprésent mais discret.

PREMIERS PAS VERS L'INVISIBLE

Bien sûr vous l'avez vu dans les champs, sur la route, sur les chaussures, salissant les mains et les vêtements des enfants. Vous l'avez aussi deviné, entraîné dans la couleur des eaux des fossés et de la rivière. Mais

avez-vous réalisé que les vins, le pot-au-feu et le morceau de bœuf qui y mijote sortent aussi du sol, nourris par lui, tout comme la verdure au bord du chemin ? Évidemment, l'appentis en torchis, mélange de paille et de sol, et la rue de la Poterie, qui existe bien à Rozay-en-Brie, n'étaient là que pour rappeler que le sol et ses argiles sont aussi des matériaux ! Avez-vous aussi senti le sol, dont l'odeur est à la fois celle qui suit la pluie (le pétrichor) et celle de la cave ? Avez-vous remarqué que la température régulière de la cave provient de ce qu'elle se trouve enfouie dans le sol ? Plus intrigant : ce climat, évoqué dès les premières phrases, qui change ou ne change pas, selon les époques, avez-vous réalisé qu'il est en partie régulé (ou dérégulé) par le sol ? Et ce saumon de la Baltique, savez-vous que sans sol autour de cette mer, il n'aurait jamais grandi ni nagé dans ces eaux-là ; avez-vous bien entrevu que même l'océan dépend du sol ?

Vous croyez que j'abuse ? Eh bien, il vous reste encore quelques pages avant d'en découvrir de plus inattendues encore, car le sol n'est rien de moins que... l'origine du monde ! Cependant, vous avez déjà discerné deux problèmes qui empêchent ceux qui le piétinent, comme vous et moi, de prendre conscience de ce qu'il est.

Premièrement, le sol est opaque, on ne voit pas à travers, pas plus qu'on ne voit à travers l'eau qui l'emporte. Le paysage que j'ai décrit n'est qu'une fraction de l'écosystème terrestre : celle qui, dans l'air limpide, nous est visible. Toute la fraction souterraine de l'écosystème et des plantes (dont un gros tiers est la masse racinaire), les multiples animaux et la kyrielle de microbes du sol : tout cela nous est invisible. La narration de ma balade a simplement omis la vie intense qui, au cœur même de l'hiver, fourmille dans le sol où, je vais vous le raconter plus tard, se trouve la plus grande fraction de la biodiversité... Avec elle, souterraine aussi, se trouve la plus grande diversité des mécanismes qui permettent le fonctionnement des écosystèmes.

Deuxièmement, le sol est "sale", dans la culture occidentale moderne au moins. Peut-être parce qu'on y enterre les excréments, les déchets et, comme dans beaucoup de civilisations, les morts ? Plus haut, de la terre "souillait" des chaussures : mais ce qui nous nourrit peut-il nous souiller ? Quoi qu'il en soit, tout cela ne nous prépare guère à percevoir la grandeur et les munificences du sol, ni à en réaliser les rôles positifs.

Or, vous avez vu le sol souffrir, recouvert par la ville de Rozay et par les routes, labouré et nu en hiver, soumis à une érosion terrible qui

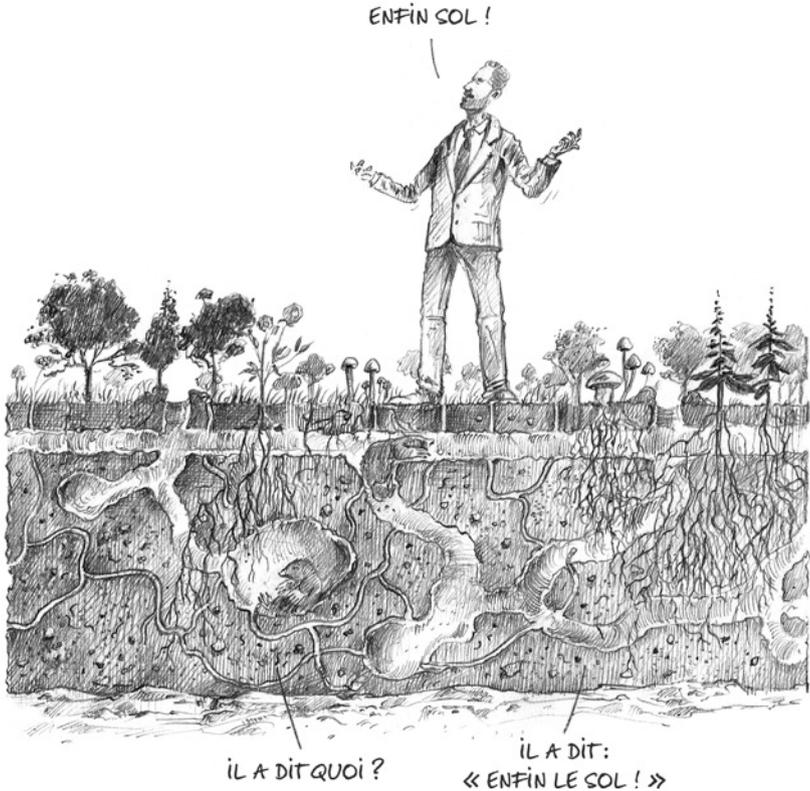
colore la rivière : mais peut-être n'avez-vous pas ressenti cela comme des blessures ? Hélas ! On se met rarement "dans la peau" du sol et de ses habitants... Alors que l'urgence est bien là, car nos sols sont littéralement en train de s'évanouir sous nos yeux : c'est aussi ce que nous allons découvrir.

Voulez-vous un dernier exemple de malentendu à propos du sol ? La plupart du temps, en langue courante, le mot désigne surtout une surface : on dit "posé au sol", "tombé au sol", "droit du sol", "sol français", "allongé à même le sol"... L'ambition de cet ouvrage est de donner une autre dimension au sol et de... creuser ce sujet en profondeur.

MA VIE PRÈS DU SOL

Il m'a fallu du temps pour m'interroger sur ce qu'est le sol, car mes propres études universitaires ne furent guère disertes sur ce sujet : vague cadre de vie de la racine, milieu riche en microbes, site du recyclage de la matière organique... Mais en rien un objet digne d'étude à part entière. Les enseignements universitaires sur le sol étaient alors souvent stéréotypés, peu appliqués et... pas toujours très clairs : une collection de banalités convenues. C'est donc peu de mon cursus initial que provient ma prise de conscience. Alors que les forestiers et les agronomes donnaient plus d'importance au sol, car la production végétale lui doit tout, à l'université, comme à Normale sup où j'étudiais, cela paraissait assez technique et peu important. C'est mon cheminement ultérieur qui a été la source de ma découverte du sol.

D'abord, alors qu'en 1992 j'effectuais une formation complémentaire à l'École nationale du génie rural, des eaux et des forêts, j'eus la chance de recevoir une journée durant l'enseignement d'un chercheur décapant de l'INRA, qui se démenait pour renouveler la compréhension des sols et de leur caractère vivant. Claude Bourguignon était alors à l'apogée de son combat. Les mois qui suivirent, je n'ouvris plus que des livres traitant du sol. J'avais été réellement bouleversé, car je réalisais qu'il avait manqué dans ma formation antérieure une énorme partie de l'histoire naturelle du vivant et des processus des écosystèmes terrestres. Mes propres professeurs avaient jusqu'alors, en matière de vie en milieu terrestre, tiré à côté de la cible : cette impression allait ensuite se confirmer à chacun de mes pas de biologiste.



Pendant ma thèse à l'INRA de Nancy, j'eus la chance d'être encadré par un spécialiste des sols. François Le Tacon dirigea mon travail sur des champignons qui nourrissent les plantes (avec lesquelles ils forment les mycorhizes que nous découvrirons au chapitre XI) : c'était une façon, encore, de me former à la vie du sol. À Nancy, je croisais dans des parages chargés d'histoire et profus de compétences en sciences du sol. La pédologie, la discipline qui étudie les sols (du grec *pedon*, sol, et *logos*, étude), avait subi un fort développement dans cette ville, notamment sous l'influence de Philippe Duchaufour (1912-2000). Ancien élève de l'École nationale du génie rural, des eaux et des forêts, sise à Nancy, il était devenu professeur de géologie et de pédologie, puis il avait été nommé professeur de pédologie à l'université de Nancy. Il avait fondé le Centre de pédologie biologique du CNRS : Nancy rayonnait alors au firmament de la pédologie. Il y avait autour de moi pléthore de spécialistes

du sol, rejetons plus ou moins directs de Duchaufour, tant à l'université qu'à l'INRA, où je travaillais, et à l'École nationale du génie rural, des eaux et des forêts. Je ne parlerai que de Jean-Louis Morel et de son approche originale des sols pollués, de François Toutain (décédé alors que j'écrivais ce livre) et de sa vision éblouissante de la litière forestière, cette couche de feuilles en décomposition, ou de Bernard Jabiol qui m'a appris à mâchonner les sols (rassurez-vous, vous apprendrez aussi, dès le premier chapitre).

Dès 1995, j'obtins de monter à l'École normale supérieure de Lyon un cours de pédologie que je donnais... encore cette année, vingt-six ans plus tard. Ces modestes éléments d'un cheminement personnel m'ont permis de sélectionner les morceaux choisis qui suivent. Je demande pardon aux pédologues qui trouveront trop simplifiée et parfois réductrice mon historiette : mais elle est contée pour ceux qui n'ont pas vu le sol. Je veux le dépeindre en une fresque accessible à chacun. J'ai commencé, sur l'idée de mon ami Mathieu Burniat et avec lui, par une bande dessinée¹ qui dessine de façon trépidante les grands traits de cet objet. À présent, je veux le présenter plus en détail dans ce livre, car le sol est omniprésent dans nos vies. En plus, il est de toute beauté : c'est un objet magnifique que je veux montrer à tous...

NOTRE VOYAGE DANS LE SOL

Notre périple sera divisé en trois grands actes. Au premier d'entre eux, nous découvrirons les composants du sol, dont ses organismes vivants. Au deuxième acte, nous envisagerons les mécanismes agissant au sein du sol, qui mettent en place les composants précédents : le sol s'animera, par sa vie en particulier ! Au troisième acte, sur les sols ainsi construits, nous ferons pousser des plantes et nous verrons comment traiter (ou ne pas traiter) les sols pour qu'ils continuent à remplir les fonctions multiples que nous leur aurons découvertes. Des fonctions qui sont à l'origine du monde que nous connaissons, et dont je pense que vous n'avez encore guère idée à cette ligne. On parie ?

Chacun des chapitres de ces trois actes est une histoire à part entière, qu'on peut lire séparément, et qui se termine par un résumé intitulé

1. Mathieu Burniat (et Marc-André Selosse, conseiller scientifique), *Sous terre*, Dargaud, 2021.

“Pour conclure...”. Les contenus des chapitres sont annoncés à la fin de leur introduction, en italique : très variés, ils ne plairont sans doute pas aux mêmes lecteurs ; mais il y en aura pour tous ! Celui qui, dans un chapitre, s’ennuierait d’une approche ou d’histoires qu’il n’aime pas est invité à aller directement à la section “Pour conclure...”, afin de poursuivre rapidement sa lecture par le chapitre suivant. Oui, on peut sauter des parties en passant par la case “Pour conclure...” ! En effet, même s’ils progressent vers une conclusion finale commune, les différents chapitres sont indépendants les uns des autres.

Ce périple souterrain est avant tout conçu pour des lecteurs non avertis qui piétinent le sol sans le connaître, parfois même sans conscience de son existence. Il leur offre un cheminement dans la nature qui nous entoure et dans leur quotidien même. Je me suis permis ici et là des renvois à d’autres chapitres pour ceux qui souhaiteront mettre en réseau les idées, mais il n’y a jamais obligation à revenir en arrière : ces renvois sont placés en chemins transverses pour qui voudrait les emprunter. Aucune connaissance chimique, géologique ou biologique n’est nécessaire et l’on évite autant que possible les termes jargonneux. Un glossaire figure en fin d’ouvrage : allez-y si un terme vous démange.

DERNIERS MOTS AVANT ENFOUISSEMENT

Parler de sol amène à recouper des aspects de mes précédents livres, sur les microbes¹ et leurs interactions avec les espèces vivantes, et sur les tannins², ces substances des plantes importantes jusque dans les sols. À force d’explorer la trame de la nature, on recroise certains fils déjà tissés. Je me suis permis des reprises de courtes sections de ces deux livres ici et là. Pardon à mes lecteurs les plus fidèles, peut-être ennuyés d’une redite : du moins reverront-ils les mêmes objets sous un autre angle, que j’espère nouveau et clarificateur. Pour les autres, ils auront avec ce volume un ensemble autonome ; ils ne liront les autres que par envie, et non par incompréhension. Les ambitions de l’ouvrage restent triplement les mêmes que dans mes deux livres précédents.

1. *Jamais seul. Ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations*, Actes Sud, 2017.

2. *Les Goûts et les Couleurs du monde. Une histoire naturelle des tannins, de l’écologie à la santé*, Actes Sud, 2019.

Premièrement, il s'agit de montrer que le monde et le quotidien qui nous entourent recèlent des explications simples et des mécanismes méconnus qui donnent leur sens à moult observations banales. En cela, je partage ici avec le lecteur un cheminement personnel qui a renouvelé ma vision du monde et qui va de ce qu'on perçoit simplement à des causes invisibles, partout présentes par leurs conséquences ! J'espère que vous ne verrez plus votre environnement de la même façon après m'avoir suivi.

Deuxièmement, je veux chatouiller l'observation. Ce livre observe et détaille la nature, réveille dans le quotidien ce qu'on finit par ne plus voir. Il observe au-delà du regard, fait sentir et toucher. Il est un rappel aux sens et à l'observation, qui nous éveillent au monde et posent des questions sur notre vie ordinaire.

Troisièmement et en priorité, ce livre veut émerveiller devant le monde : cette histoire naturelle des sols déshabille la nature pour en voir la beauté nue, celle de mécanismes explicatifs et de faits simples dont chacun explique de multiples observations. Cette compréhension peut retisser notre lien, actuellement perdu, au monde naturel : c'est en comprenant et en contemplant qu'on peut gérer mieux et plus durablement.

Nous l'avons dit, souvent maltraité par l'homme, le sol va mal ; les lignes qui suivent parleront de ces blessures-là. Sans céder à l'*agribashing*, dans un pays que ses agriculteurs nourrissent sans grande reconnaissance de la population, nous envisagerons comment des solutions qui ont paru bonnes autrefois nécessitent à présent évaluation ou remplacement. Mais ni le diagnostic des maux, ni l'esquisse des remèdes ne peuvent se faire sans une compréhension du sol en lui-même.

Venez, allons ensemble à la rencontre de ce qui n'est rien de moins que... l'origine de notre monde.

Acte I

L'ÂME DES SOLS :
LES INGRÉDIENTS D'UN GRAND POT-POURRI

I

UN DUR AU CŒUR TENDRE : DE LA FRACTION SOLIDE DU SOL

Où l'on commence par reposer ce livre ; où l'on mélange du sol à de l'eau pour en séparer les parties ; où les plus petits comme les plus grands ont des vertus ; où l'on choisit entre déguster un sol et déguster son dentifrice ; où l'on redécouvre un détachant à sec de nos aïeux, injustement oublié ; où les argiles s'effeuillent pour vous ; où la mort des organismes fait porter un voile noir au sol ; où un jeu avec des liquides douteux met en évidence des noms bizarres et où ce qui est noir n'est pas clair ; où le sol se dérobe parfois, en particulier sous la pauvreté ; et où la résistance des sols est mise à l'épreuve.

On ne doit pas commencer ce livre sans prélever et observer un fragment de sol. Allez dans votre cuisine, prenez une vieille assiette creuse puis rendez-vous dehors, dans votre jardin ou dans un jardin public. Prenez une poignée ou un bloc de sol, même si vous n'êtes pas chez vous : personne ne sait que le sol est assez précieux pour vous reprocher ce larcin. Les plus chanceux ont une plate-bande sarclée. Ça fait peut-être un peu mal aux mains mais ça vient ! Les autres en sont quittes pour retourner chercher un outil, couteau, truelle ou bêche. Eh oui, il le faut impérativement, retournez chercher l'outil manquant, car ce sol nous resservira plus tard.

Non, ce livre n'est pas mal fichu et le protocole de ce prélèvement n'a pas été livré dans le désordre : je voulais juste vous faire remarquer que le sol est dur et que, pour en détacher des fragments, il faut des outils comme celui que vous êtes retourné chercher ou bien celui du jardinier qui avait sarclé la plate-bande. Ah, aussi : regardez vos doigts, maintenant ; ils sont un peu brun-noir à présent... Le sol est dur et coloré. Il est aussi dense : soupesez donc l'assiette...

Ces observations-là nous suffiront pour l'instant, car il ne nous faudra rien de moins qu'un chapitre pour les exploiter. Rentrez avec votre morceau de sol dans l'assiette et gardez-le sur une étagère de la cuisine pour plus tard : il nous resservira. Rincez-vous les mains, et reprenons...

Dans ce premier chapitre, nous allons examiner la fraction solide des sols, en commençant par la taille des fragments, puis leur composition. La nature minérale et organique de la fraction inerte du sol nous expliquera à quel point le sol est ferme et constitue un appui et un matériau solide... à condition de l'entretenir, et en craignant l'excès d'eau.

DES FRAGMENTS DE TOUTES TAILLES

Je ne sais pas si le fragment que vous avez prélevé l'illustre bien, mais il y a souvent des morceaux de toutes tailles dans un sol. On l'observe en regardant sédimenter les constituants d'un sol qu'on a préalablement agité avec de l'eau dans un long tube en verre étroit ou une bouteille : en l'absence du contenant idéal, une éprouvette graduée, cela peut être difficile à voir à la maison. Quand l'agitation cesse, les plus gros morceaux retombent très vite, bientôt suivis de grains plus petits, puis d'autres plus petits encore, puis de particules fines et, dans l'heure qui suit, d'une lente pluie de particules plus fines encore. La vitesse de chute dans l'eau est d'autant plus rapide que la taille est grande, ce qui trie ce que le sol mélange : des particules de toutes tailles, mais en proportions variables d'un sol à l'autre.

Commençons par nous intéresser aux morceaux qui mesurent plus de 2 millimètres : ce sont les cailloux et les morceaux de plus grosses tailles, ou blocs... Par chez moi, en Bretagne, les agriculteurs les appellent "le squelette du sol", mais dans les sols labourés ce sont plutôt des squames qui se détachent en permanence de la roche située par-dessous. À chaque labour il en remonte ! Tant et si bien que dans beaucoup de régions on les retire au fur et à mesure du champ où ils gênent le travail agricole. Ces morceaux de pierre pouvaient être jetés dans le champ du voisin pour l'importuner (une action peu charitable nommée "scopélisme") ou permettre de faire des murets, des tas qu'on appelle "murgers", voire des abris grossiers. Quand la roche sous-jacente se délite facilement, les cailloux et les blocs abondent tellement que l'épierrage produit, sur plusieurs siècles, de larges et hauts murgers : certains paysages méditerranéens ressemblent ainsi à une mosaïque de monticules pierreux et

de petits champs que l'observateur comprend souvent mal... On voit un très bel exemple de cette mosaïque, témoin d'une lutte séculaire de l'homme contre la caillasse, depuis l'autoroute A75 en montant de Montpellier vers le plateau du Larzac, juste avant le pas de l'Escalette !

La remontée permanente des cailloux et des blocs s'explique par le labour. Quand celui-ci les soulève, très souvent des constituants plus petits se glissent sous eux avant qu'ils n'aient eu le temps de retomber à leur position initiale. Mélangez des petites et des grosses billes (de même densité) et agitez : vous verrez que les plus grosses finissent par-dessus. C'est là une facétie du labour, car sinon les gros blocs tendent à être recouverts : en forêt ou dans les pâturages, on n'en voit guère en surface... En effet, habituellement, des vers de terre (que nous détaillerons au chapitre iv) enfouissent petit à petit les plus gros morceaux car ils avalent du sol en profondeur et le rejettent en surface, là où ils ont la place de faire leurs crottes. Cette action minuscule, mais répétée d'année en année, tend à recouvrir lentement les plus gros fragments qu'ils n'avalent pas.

À LA RECHERCHE DES PLUS PETITS

Intéressons-nous aux fragments de moins de 2 millimètres, à partir desquels les spécialistes des sols, les pédologues, définissent la granulométrie (ou texture), c'est-à-dire les tailles des plus petites particules d'un sol. Négligeant les fragments les plus gros, ils définissent trois catégories parmi ceux de moins de 2 millimètres. De 2 à 0,050 millimètre, on appelle ces fragments des sables. Entre 0,050 et 0,002 millimètre, on les nomme des limons (dans certaines classifications, la limite supérieure est à 0,075 ou 0,063 millimètre, mais cela ne change pas grand-chose). Au-dessous de 0,002 millimètre, on parle d'argiles. Attention, les mots "sable" et "argile" indiquent ici des tailles (et non pas la composition, car nous verrons un peu plus loin qu'ils ont un autre sens désignant une composition). Quand l'une des fractions domine, on dit que le sol est sableux, argileux ou limoneux. Quand deux fractions dominent, on dit qu'il est sablo-limoneux, ou limono-argileux...

Si les sables sont la plupart du temps réparables à l'œil, on entre dans l'invisible avec les limons et les argiles : comment les distinguer ? Tous deux forment des pâtes avec l'eau mais si l'on fait un boudin, en roulant le sol entre les mains, on peut distinguer les sols riches en argiles

car alors le boudin ne se casse pas, même si on le ploie pour faire un cercle : cette plasticité permet la poterie ! À l'inverse, un boudin riche en limons, moins cohérent, se rompt si on tente d'en faire un cercle. Mais cela ne distingue que les sols très riches en argiles de ceux qui sont très riches en limons, or souvent il y a mélange des deux catégories. La présence de limons, elle, laisse sur les doigts une poudre un peu soyeuse et comme une impression d'écailles d'ailes de papillon, car là encore les limons sont moins cohérents. Les limons peuvent aussi se tester... en bouche ! Les pédologues aguerris goûtent le sol en cas de doute. Les particules d'argile sont trop petites pour être senties mais celles de limon crissent très finement entre les dents. Prenez votre dentifrice : il contient souvent de la poudre de silice de la taille de limons, qui aide à l'abrasion de la plaque dentaire lors du brossage. Frottez vos dents entre elles avec la pâte dentifrice en bouche et vous sentirez ces légers crissements sous la dent ! C'est la preuve de la présence de limons.

D'un point de vue agronomique, faut-il préférer un sol sableux, limoneux ou argileux ? Les propriétés distinctes de chacune de ces fractions font que leur excès nuit, mais que leur présence en mélange est utile. Les cailloux, blocs et sables ont en commun de ménager de gros espaces entre eux, par où l'eau et l'air peuvent passer (nous y reviendrons aux chapitres suivants) : cela est important pour la vie du sol, qui a besoin de cette eau et respire cet air. Mais trop de trous est nuisible : vous avez vu comment l'eau versée sur le sable d'une plage s'enfonce sans être retenue ! Il ne suffit pas que l'eau passe, il faut aussi en retenir : nous verrons bientôt comment limons et argiles retiennent justement l'eau dans le sol en y créant de plus petits espaces entre eux.

Cela dit, trop d'argiles peut retenir l'eau trop fortement pour qu'elle soit accessible aux êtres vivants, et aux racines en particulier. Les limons ont un effet négatif différent : en trop grande abondance, ils sont sensibles au tassement. Sur un sol découvert ou labouré, ils se réorganisent entre eux sous le battement des gouttes de pluie et se compriment en une croûte de limons imbriqués, la croûte de battance, qui freine l'entrée de l'air et de l'eau dans le sol... Si l'on roule dessus avec des engins lourds, ils se réorganisent en profondeur, réduisant la taille des pores du sol : ce tassement diminue aussi le passage de l'eau et de l'air.

Les limons ont en revanche une propriété positive, liée à leur très petite taille. Plus la taille d'une particule est petite, plus sa surface est grande par rapport à son volume. La surface des limons est donc très grande par rapport à celle des sables... Comparons un sable de

1 millimètre de diamètre à un limon de 0,01 millimètre en moyenne, donc 100 fois plus petit en diamètre : pour un même volume, la surface de matériau sera 10 000 fois plus grande dans le cas des limons ! Or, c'est par leur surface que les constituants du sol libèrent des substances nutritives pour les microbes et les plantes, c'est-à-dire des sels minéraux comme le phosphate, le magnésium ou le potassium ; nous y reviendrons à l'acte II de cet ouvrage. Les limons libèrent donc souvent plus vite la fertilité du sol que les sables ! Vous allez penser que c'est encore plus marqué pour les argiles, car elles sont plus petites encore : toutefois, beaucoup de formes d'argiles sont stables, peu attaquées dans les sols. En revanche, elles retiennent les sels minéraux libérés dans les sols, nous allons le découvrir au chapitre III, et contribuent donc par là à la fertilité du sol.

Une présence équilibrée de sable, de limon et d'argile fait donc la fertilité du sol... L'équilibre de ces fractions dépend aussi du climat : en zone pluvieuse où le drainage est vital, on préférera plus de sable. La taille ne compte pas, c'est une contribution de particules de toutes les tailles qui est souhaitable : là comme ailleurs, pas de premiers de cordée, mais juste des imperfections des uns et des autres qui se compensent et des qualités qui s'additionnent. De l'union émergent les propriétés de l'ensemble. Nous connaissons à présent les tailles, mais pas encore la nature de ces particules : découvrons à présent comment elles proviennent de la roche, mais aussi de la vie.

LA MATIÈRE MINÉRALE DES SOLS

Nous l'avons déjà vu à propos des blocs : une partie des composants du sol provient de la roche sous-jacente. C'est pour cela qu'on parle à son propos de "roche-mère", car elle contribue à engendrer le sol dans les profondeurs. Il y a donc des morceaux de roche de toutes tailles dans le sol, qui proviennent de la roche-mère par fragmentation : par exemple, des petits bouts de granite dans un sol breton. Mais il y a aussi là des composants modifiés par leur séjour dans le sol. Prenons par exemple le cas de la kaolinite, exploitée près de Lorient, à Ploemeur, pour rester en Bretagne et sur une roche-mère granitique : ce matériau blanc sert à faire la porcelaine ou des céramiques fines. La kaolinite est en fait produite par la modification, dans le sol ou à son contact, d'un des constituants du granite, le feldspath potassique.

Il serait vain de livrer ici un catalogue des espèces chimiques, appelées “minéraux”, présentes dans les sols. Une roche est composée d'un ou plusieurs minéraux assemblés ; les sols en contiennent souvent bien plus que la roche-mère, puisqu'ils reçoivent les minéraux de celle-ci et ceux qui en dérivent par transformation en son sein. La diversité minérale est extraordinaire dans les sols, qui renferment plus de la moitié des espèces minérales connues dans la nature. Certains minéraux se forment dans le sol par réorganisation à partir d'autres minéraux préexistants. L'un d'eux, par exemple, riche en fer, se forme dans les sols saturés en eau et pauvres en oxygène (qu'on appelle des gleys) auxquels il donne, en profondeur, une couleur vert-bleu : la fougérite, ainsi nommée car elle a été décrite dans des sols de la forêt de Fougères, en France.

Arrêtons-nous néanmoins sur deux familles de minéraux fréquents, dont le nom a déjà été rencontré dans un autre contexte : les sables et les argiles. Nous voilà confrontés à un problème hélas fréquent dans l'étude des sols : un mot peut avoir plusieurs sens. Nous avons vu sables et argiles comme des tailles des particules solides du sol. Mais (au risque de confusion, désolé) il existe un second sens minéralogique, c'est-à-dire indiquant une composition minérale.

“Sable” est aussi le nom du minéral fait de quartz, c'est-à-dire d'oxyde de silicium. Le sable (dans ce sens-là, on l'utilise plutôt au singulier) qu'on achète dans le commerce, pour le nettoyage des façades, pour fabriquer du verre, pour la maçonnerie ou pour le jardinage, est un sable à la fois par la taille des grains et parce qu'il est fait de quartz... En fait, quand une roche-mère granitique s'altère, elle libère les cristaux de quartz qu'elle contient : vu leur taille, cela donne un sable à la fois par la granulométrie et par la composition ! Donc, souvent le sable par la taille est un sable par la composition, et vice-versa, d'où l'utilisation du mot en granulométrie. Vous-même, la plupart du temps, vous utilisez “sable” dans le sens de la granulométrie : sur une plage, les grains du “sable” mélangent des fragments de quartz, des morceaux de coquillages faits de calcaire, et pas mal d'autres choses ! Dans les sols, il y a souvent des fragments de quartz, c'est-à-dire des sables au sens minéralogique.

Venons-en aux argiles, très fréquentes dans les sols. Le mot désigne cette fois toute une famille de minéraux, réunis par deux caractéristiques communes : ce sont des phyllosilicates (nous allons décrire ce que c'est) et ils sont stables dans les conditions chimiques de la surface de la Terre, notamment dans les sols. Les phyllosilicates sont des minéraux faits d'une alternance de couches microscopiques contenant de

l'aluminium et de couches contenant du silicium, empilées dans leur structure chimique. Certaines argiles sont faites de la répétition d'une alternance de chaque couche, les argiles appelées "1:1" : c'est le cas de la kaolinite décrite plus haut ! D'autres, 2 fois plus riches en silice, sont faites de la répétition d'un motif constitué de deux couches de silicium entourant une couche d'aluminium, les argiles 2:1. C'est le cas de la montmorillonite ou terre de Sommières, une argile autrefois utilisée comme détachant à sec et qui était exploitée pour cet usage à Montmorillon, dans la Vienne, et à Sommières, dans le Gard. La smectite, utilisée en pharmacie comme composant d'un antidiarrhéique, le Smecta, appartient aussi aux argiles 2:1. On devine ici une propriété importante des argiles : celle de se lier à d'autres composants. La montmorillonite se lie à la crasse ou aux colorants des taches ; la smectite se lie aux virus, aux toxines alimentaires et aux bactéries pathogènes. Cette structure minérale caractérise globalement les minéraux nommés "phyllosilicates", mais tous les phyllosilicates ne sont pas des argiles : seuls ceux qui ne se dégradent pas (ou très lentement) au contact de l'air sont des argiles. Les micas, des minéraux qu'on trouve dans les granites, sont des phyllosilicates sans être pour autant des argiles, car ils s'altèrent lentement au contact de l'air.

Phyllosilicates stables à l'air libre, les argiles au sens minéralogique se présentent souvent en particules qui sont des argiles au sens granulométrique : ici, comme pour les sables, la taille la plus fréquente du minéral a donné son nom à la classe granulométrique ! Mais bien d'autres minéraux (comme par exemple un tout petit bout de quartz qui mesurerait moins de 0,002 millimètre) comptent parmi les argiles au sens granulométrique. Les argiles au sens minéralogique sont souvent abondantes dans les sols, où elles proviennent de la roche-mère ou de sa transformation.

Notons enfin que, d'un point de vue géologique, certaines roches sont faites entièrement d'argiles ou de pur sable au sens minéralogique. Les argiles des sous-sols de Lorraine et les sables et grès de Fontainebleau sont des roches qui montrent qu'argiles et sables, au sens minéralogique, existent aussi dans le domaine géologique...

Un dernier ensemble de minéraux notables des sols, qui les colore fréquemment, est constitué par les oxydes et les hydroxydes de fer, de couleur ocre-rouge : le fer impliqué est le fer ferrique, présent dans les sols aérés, que vous connaissez aussi comme constituant la rouille. Il se trouve là des oxydes de fer comme l'hématite, Fe_2O_3 , ou des hydroxydes

comme la goethite $\text{FeO}(\text{OH})$. Il ne faut pas confondre la forme ferrique avec la forme dite "ferreuse", bleu-vert, des sols peu riches en oxygène, par exemple présente dans la fougèrite. Les minéraux de fer ferrique expliquent le brun-ocre de certains sols de chez nous ; dans les régions tropicales, les couleurs rougeoyantes des sols proviennent de grandes quantités de fer ferrique, liées à la combinaison de la chaleur et de l'humidité... Et dans nos régions méditerranéennes, au climat plus chaud que le Nord de la France, les sols sont déjà plus rougeâtres.

En manipulant du sol dans l'introduction de ce chapitre, cependant, nous avons remarqué qu'il est souvent sombre ou noir. Venons-en maintenant à la deuxième partie des composants solides, celle qui macule les doigts en noir : place à la matière organique !

LA MATIÈRE ORGANIQUE DES SOLS

Peut-être certains ont-ils été chercher leur sol, au début du chapitre, dans une forêt où le sol de surface n'est pratiquement fait que de matière organique, facile à creuser et peu dense. Ceux-là verront aisément des restes de feuilles, entières ou fragmentées et plus ou moins reconnaissables. Bien sûr, il y a des racines, peut-être ici ou là un ver de terre ou un insecte : mais gardons ce qui est vivant pour plus tard, au chapitre IV. Il existe aussi une fraction inerte, ou morte, de la matière organique qui dérive de parties perdues par les organismes (excréments, feuilles, branches) ou de cadavres qui finissent au sol. La fraction morte représente de 60 à 99 % de la matière organique totale, selon les types de sol : les organismes vivants ne composent qu'une fraction mineure de la matière organique souterraine.

On appelle "matière organique" le matériau dont sont faits les organismes vivants, d'où ce qualificatif d'"organique" d'ailleurs. Chimiquement, ses molécules constitutives comportent des atomes de carbone reliés entre eux dans leur structure chimique. Par exemple, l'eau (H_2O) ne contient pas de carbone (noté C en chimie) et n'est donc pas organique ; le gaz carbonique CO_2 a un atome de carbone isolé, non relié à un autre carbone : il n'est donc pas organique non plus. Le sucre ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) contient six atomes de carbone reliés entre eux à la queue leu leu : il est organique, tout comme les protéines, les lipides, les autres sucres (dont l'amidon ou la cellulose), les tannins, etc. Les molécules de la matière organique contiennent aussi d'autres atomes,

comme l'oxygène et l'hydrogène, voire, selon les cas et en plus petite quantité, le soufre, l'azote ou le phosphore.

La matière organique morte peut être reconnaissable, du fragment de feuille au morceau de bois. Mais le plus souvent elle est faite de particules si petites qu'on ne les voit pas : ces fragments-là font partie, par leur taille, des limons et des argiles au sens granulométrique. Cette matière est noire car elle comprend de très, très nombreuses molécules différentes (dont l'inventaire complet échappe encore à toute analyse). Chacune a sa couleur propre, c'est-à-dire qu'elle absorbe tous les rayonnements lumineux correspondant aux autres couleurs, mais renvoie vers l'extérieur ceux qui lui confèrent sa couleur. Si on mélange des molécules de différentes couleurs, comme c'est le cas dans le sol, chaque rayonnement lumineux finit par être absorbé par au moins l'une des molécules présentes... de sorte qu'au total du mélange, plus rien ne ressort : c'est le noir ! Dans le sol, la diversité chimique engendre les ténèbres... et tache les doigts quand on la touche.

HUMINE, ACIDES HUMIQUES ET FULVIQUES

Explorons et nommons à présent les grandes catégories de ces molécules, invisibles si ce n'est par leur noirceur. Pour cela, tamisons un sol pour en enlever les plus gros morceaux. Puis prenons de l'eau et rendons-la basique¹ : techniquement, on ajoute de la soude concentrée, un truc à faire au labo exclusivement, car un liquide aussi basique ronge tout (c'est la recette des déboucheurs liquides) ! Versons un peu du sol tamisé, agitions (sans giclures, ça ferait des trous), puis filtrons sur papier-filtre. Dans le papier reste un peu de matière organique noire et indistincte : c'est ce que l'on appelle l'humine, insoluble en milieu basique. Recueillons le liquide qui percole : noirâtre, il contient donc aussi de la matière organique. Ajoutons maintenant à ce liquide

1. Un liquide est acide s'il contient des ions H^+ , comme le vinaigre par exemple, et il l'est d'autant plus que ces ions-là sont concentrés. À l'opposé, s'il est pauvre en ions H^+ , il tend alors à être relativement plus riche en ions OH^- et on le dit basique, comme un savon, un déboucheur liquide d'évier ou une solution de soude ; il est d'autant plus basique que les ions OH^- sont concentrés. Si les quantités d'ions H^+ et OH^- sont égales, le liquide est dit neutre. En d'autres termes, un liquide est acide, neutre ou basique.

filtré quelques gouttes d'acide chlorhydrique pour l'acidifier. Au bout de quelques instants, la teinte du liquide, auparavant homogène, se condense en nuages noirs. Petit à petit, une substance s'agrège et flotte lentement vers la surface : ces substances organiques insolubles en milieu acide sont les acides humiques. Le liquide acidifié résiduel, lui, reste cependant d'un jaune légèrement brun car il comporte une dernière substance organique : les acides fulviques, nommés par leur couleur (du latin *fulvus*, jaune), qui sont donc solubles en milieu aussi bien acide que basique.

Trois grands types de substances organiques existent donc, selon leur comportement face à l'eau dans l'expérience précédente. L'humine ne s'y aventure jamais ; les acides humiques sont entraînés dans l'eau basique mais pas dans l'eau acide ; les acides fulviques sont toujours solubles quelle que soit l'acidité. Leurs abondances relatives varient selon les sols, comme nous le détaillerons au chapitre VIII. Acides humiques et fulviques colorent les eaux de certaines rivières lorsqu'ils sont entraînés hors des sols, expliquant jusqu'au nom de fleuves comme le rio Negro en Amazonie. Personne ne sait vraiment la structure exacte des molécules de ces trois catégories : à vrai dire, il s'agit d'un mélange complexe de milliers de molécules pour chacune, différentes d'un sol à l'autre. Si la chose vous tourmente, l'image globale que l'on s'en fait est décrite en encadré.

Les différences chimiques entre humines, acides humiques et acides fulviques

Humines, acides humiques et acides fulviques contiennent des parties qui ont très peu d'affinité pour l'eau : on les dit "hydrophobes". Greffées sur les précédentes, d'autres parties interagissent bien, quant à elles, avec les molécules d'eau : on les dit "hydrophiles" (comme le coton, qui s'imbibe en présence d'eau, et est justement hydrophile). La proportion de chaque partie varie dans la matière organique du sol.

Les humines ont peu de parties hydrophiles et l'effet de leurs parties hydrophobes l'emporte : elles évitent toujours l'eau. Les acides fulviques, généralement petits, ont moins de parties

hydrophobes et leurs parties hydrophiles l'emportent toujours. Les acides humiques sont, quant à eux, partagés entre parties hydrophobes et parties hydrophiles : ils hésitent entre ces deux tendances. En milieu basique, les parties acides contenant de l'oxygène (appelées carboxylates) sont chargées négativement et cette charge électrique interagit fortement avec l'eau : la balance penche globalement en faveur des parties hydrophiles et l'acide humique passe dans l'eau. Mais si le milieu est acide, les ions H^+ s'attachent aux carboxylates : la charge diminue et avec elle le caractère hydrophile global des acides humiques ; dès lors, ils évitent plutôt l'interaction avec l'eau et se séparent de celle-ci.

Aujourd'hui, de nombreuses voix critiquent cette classification en trois catégories et leur existence même : selon ces détracteurs, le traitement initial par une solution extrêmement basique (une condition qui n'existe jamais dans les sols) modifierait la matière organique et ferait apparaître, lors de réactions chimiques induites par la soude, des catégories sans réelle existence préalable. De plus, les structures chimiques mentionnées en encadré ci-dessus ne seraient pas complètement exactes. Même si j'en suis persuadé, il me paraît trop tôt pour offrir une autre vision simple : je garde donc humines, acides humiques et acides fulviques comme une représentation utile, jusqu'à plus ample information et en ayant à l'esprit leurs imperfections ! Mais puissent ces lignes de doute vous illustrer notre méconnaissance crasse de la matière organique des sols : cette chimie sous nos pieds reste plutôt... obscure.

La matière organique a, quelle que soit la taille de ses fragments (des plus gros aux plus petites molécules), plusieurs rôles majeurs qui jalonnent ce livre. D'abord, elle a tendance à engluer les autres composants et donner du liant physique aux éléments minéraux : elle est le cœur tendre du sol. Quand on trempe un sol dans de l'eau, son délitement sera d'autant plus rapide qu'il est pauvre en matière organique. Ensuite, elle est souvent hydrophile et retient donc l'eau dans le sol, ce qui a de l'importance dans beaucoup de processus que nous décrirons, dont... l'alimentation en eau des plantes ! De plus, elle nourrit de sa matière des microbes que nous découvrirons bientôt, au chapitre IV : elle est un aliment du sol. Enfin, elle peut contribuer à retenir les sels

minéraux (notamment ceux qui ont une charge positive, comme le potassium K^+ , puisqu'elle-même a une charge souvent négative). Nous la reverrons bientôt au cœur de la vie des sols.

LA CONCENTRATION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DANS LES SOLS

Voilà révélée la diversité de la matière organique : reconnaissable ou non, elle est plus ou moins abondante dans les sols. Un sol forestier en est bourré, tandis que nos sols agricoles habituels sont moins riches en matière organique : cela s'explique par les récoltes, qui emportent les produits végétaux avant leur chute au sol, et le labour dont nous verrons au chapitre x qu'il aide les organismes du sol à respirer... ce qui consomme de la matière organique. Cette moindre teneur explique la couleur plus claire des sols agricoles... Allez par vous-même comparer champs et forêts voisines au cours d'une randonnée, c'est très parlant !

La teneur en matière organique des sols varie la plupart du temps de 1 à 10 %, avec des exceptions allant jusqu'à 20 %, voire 100 % dans certains sols où la matière organique abonde, car le climat froid et l'eau la protègent de l'attaque par les microbes. Les sols humides des tourbières, en montagne ou dans le Nord de l'Europe ou du Canada, contiennent ainsi 25 % du carbone organique des sols du monde, alors qu'ils ne couvrent que 3 % de la surface du globe ! Comme elle vient surtout du dessus, la matière organique des sols se trouve principalement dans les 30 premiers centimètres : à l'échelle mondiale, cette pellicule contient environ 1 500 milliards de tonnes de carbone sous forme organique, soit davantage que l'ensemble du carbone contenu dans la végétation (600 milliards de tonnes) et dans l'atmosphère sous forme de CO_2 (720 milliards de tonnes). Ramené à l'hectare, cela représente, par chez nous, de 80 à 120 tonnes de carbone par hectare de forêt ou de prairie et de 40 à 60 tonnes de carbone en sol cultivé. À cela, il faut ajouter le carbone organique stocké à plus de 30 centimètres dans le sol, moins bien connu et moins concentré, mais qu'on estime à plus de 20 % du stock total !

Au bilan, la matière organique des sols représente entre 60 et 90 % de la biomasse totale des écosystèmes terrestres, c'est-à-dire de toute leur masse de matière organique, vivante ou morte. Dans une forêt, où les troncs sont volumineux, on avoisine de 60 à 70 % ; dans une prairie

où la biomasse des herbes est réduite, on atteint de 70 à 90 %. Le lecteur commence à entrevoir ici que, quantitativement, les écosystèmes terrestres sont... cachés au cœur du sol.

LA FERMETÉ DU SOL ET SES LIMITES

Nous arrivons à présent dans l'État de Rio de Janeiro, au mois d'avril 2010, sous les pluies torrentielles de cette année-là : il pleut incessamment, les inondations gagnent de partout. Dans la journée du 8 avril, à Niterói, une favela sur le flanc d'une colline est brutalement entraînée dans un torrent de boue : entre cent et deux cents morts s'ajoutèrent alors aux autres décès liés aux inondations elles-mêmes. Combien d'autres favelas sont emportées de temps à autre par des coulées de boue, dans l'indifférence générale et sans que les autorités dénombrent avec exactitude les cadavres des pauvres ? Cette triste histoire nous parle de la stabilité des sols et de ses limites.

Car les sols offrent normalement un ancrage ferme par leurs particules solides : certains lecteurs ont dû batailler pour détacher un bout de sol au début du chapitre. Nous y plantons nos piquets et nos poteaux, les plantes s'y ancrent de leurs racines, et toute la végétation se dresse appuyée dessus. Qui désherbe sait qu'il faut tirer fort pour arracher les racines, si tant est que la tige ne cède pas. Beaucoup de fondations de maison ne vont pas jusqu'à la roche mais s'insèrent simplement dans le sol (dans les favelas, par exemple). Le sol nous paraît ferme et l'adage "avoir les deux pieds sur terre" veut justement dire "faire preuve de solidité". Les deux composants solides du sol se conjuguent pour en faire un bon support : la matière organique en relie les composants telle une glu ; la matière minérale est dense et fait inertie de son poids. Car le sol est dense. Certes, il contient de la matière organique dont la densité est inférieure à 1 (une densité de 1 correspond à une masse par unité de volume équivalente à celle de l'eau : avec une densité au-dessous de 1, on flotte ; au-dessus de 1, on coule). Mais il enferme majoritairement des minéraux dont la densité, variable, est toujours supérieure à 1. Même si la porosité du sol et la teneur en matière organique varient, la densité résultante est souvent voisine de 1,2 à 1,3, ce qui fait inertie.

Cependant, il y a seuil de rupture, quand la force exercée arrive à vaincre l'inertie du sol : les arbres arrachés avec leur motte par les grandes tempêtes en témoignent. Ce seuil est abaissé lorsque de l'eau imbibe le

sol. En effet, elle désolidarise les éléments et réduit donc les forces de frottement qui s'opposent à leurs mouvements entre eux ; en plus de ce rôle lubrifiant, elle diminue le poids des éléments les plus lourds par la poussée d'Archimède et réduit donc l'inertie du sol. Sur une pente, le sol peut alors glisser (on parle de "solifluxion") : ainsi commença le glissement des cinquante maisons de la favela de Niterói... entraînées par le sol transformé en boue dense, très porteuse à cause de sa densité. C'est aussi ce qui explique, dans les torrents de montagne, le transport d'énormes blocs lors de crues : on croit qu'ils sont roulés par la force du flot. Cependant se cache aussi un effet de la poussée d'Archimède, qui est d'autant plus forte que le milieu est dense. Portés dans un mélange de sol et d'eau de densité supérieure à celle de l'eau seule, ces énormes blocs flottent plus ou moins dans la boue dense qui les charrie. Les murs des maisons de Niterói furent ainsi transportés par les boues.

Le sol est donc plus déformable et moins rigide s'il est humide. Dans la technique du pisé, aussi appelé "torchis", un sol argileux ou limoneux est d'abord malaxé dans l'eau et mis en forme à l'état humide, avec une incorporation de paille ou d'autres fibres végétales comme armature. Puis il sèche et durcit : en place, il nécessite néanmoins un entretien car la pluie finit par l'éroder. Des variantes existent : la bauge est l'utilisation de ce matériau comme mortier entre des morceaux de bois ou des pierres ; les revêtements en terre battue dans les maisons sont obtenus en foulant ce matériau pour le compacter. En Europe, le pisé, autrefois très utilisé là où le bois et les pierres dures manquaient, est devenu anecdotique. Mais ailleurs, on lui doit des merveilles d'architecture, comme en Afrique du Nord : j'ai eu la chance de visiter, au Maroc, la belle kasbah d'Aït-ben-Haddou, près de Ouarzazate, avant que le tourisme n'y déferle, entraînant un marathon de reconstruction : bien des maisons en pisé abandonnées fondaient alors littéralement sous l'effet des pluies, pourtant rares. Ailleurs sous les tropiques, des sols riches en oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium, les latérites que nous recroiserons au chapitre IX, constituent un matériau idéal de construction : leur nom vient d'ailleurs du latin *later*, brique, parce que ces sols sont très utilisés à cette fin. Ces latérites tropicales sont pâteuses tant qu'elles sont humides : on découpe des moellons qui durcissent en séchant au soleil et sont utilisés pour bâtir, en particulier en Inde. Le cœur des murs des splendides temples d'Angkor, au Cambodge, est en latérite : mais vous ne l'avez jamais vu car il est paré en surface de blocs de grès ornementaux et protecteurs, plus résistants aux intempéries.



Enfin, la force du sol se ressent dans les sols argileux, mais cette fois au préjudice des bâtiments. Les argiles (au sens minéralogique) retiennent bien l'eau, le chapitre suivant nous dira pourquoi : un sol très argileux se dilate donc sous l'effet de l'eau retenue à la saison humide, puis se contracte en séchant. Les sols très argileux se repèrent d'ailleurs aisément par les craquelures qui s'y dessinent en surface durant l'été. Cela les rend dangereux pour les constructions de surface (terrasse ou piscine) et les bâtiments modernes dont les fondations ont des profondeurs mal adaptées : soumis à des distensions variables, ils peuvent se disloquer, notamment lors de grandes sécheresses... Les maisons fissurées peuvent devenir inhabitables. Ce problème touche plus de 8 500 communes françaises, dont 7 000 avaient demandé l'état de catastrophe naturelle après que les grandes chaleurs de 2003 eurent desséché leurs sols très argileux ! Des fondations plus profondes, des dispositifs couvrant le sol (contre les pertes en eau) ou encore un drainage (pour évacuer les excès d'eau) peuvent limiter ces risques.

DE LA PORTANCE À LA TERRE BATTUE

Bien plus pragmatiquement, la portance évoque des cauchemars à certains agriculteurs : la portance est la capacité d'un sol à porter le marcheur ou des engins agricoles sans qu'ils s'enfoncent, en particulier quand il est humide. Cette propriété majeure des sols passe inaperçue jusqu'à ce qu'elle disparaisse... Le poète français Jacques Prévert (1900-1977) aurait eu une formule très juste pour toutes ces choses du quotidien dont l'habitude nous fait oublier la présence, et dont seule l'absence nous fait réaliser l'importance : "J'ai reconnu mon bonheur au bruit qu'il a fait en partant." La fermeté d'un sol est chose si attendue que nous oublions qu'elle est construite et se mérite !

S'il est habituel de s'embourber sur un chemin de terre, le problème se pose rarement quand on "mord" sur sa bordure enherbée. Souvent d'ailleurs, nos chemins de terre humides sinuent autour des ornières : s'il n'y a pas de fossé, les voitures ou les passants s'appuient sur les côtés où la structure du sol est intacte et plus ferme. En forêt, il est rare qu'un engin s'embourbe : la portance du sol est souvent bonne. Mais dans les sols agricoles, le travail du sol, l'absence de végétation à certaines saisons et la pauvreté en matière organique détruisent la cohésion. Le labour, qui aidera les racines à pousser, nuit à la portance. Il peut être impossible de rentrer un tracteur dans certaines parcelles sans l'embourber après une pluie... voire durant toute la saison humide, ce qui met en péril le calendrier de l'activité agricole. Le plus souvent, la parcelle reste accessible mais les roues entraînent du sol : le travail est compliqué, en durée comme en énergie, et le tracteur repart en laissant sur les routes des traces de terre arrachée à la parcelle.

Divers facteurs concourent à la portance, dont certains (humidité du climat, teneur en argile) sont imposés. Il n'en va pas de même d'autres facteurs qu'on peut optimiser ou dégrader : la matière organique, qui relie les particules du sol ; une couverture végétale qui retient le sol de ses racines et, en surface, de ses tiges ; et un sol dont la vie n'a pas été endommagée, qui entretient la structure du sol (en particulier les vers dont nous détaillerons les effets aux chapitres VII et X). Enfin et surtout, le poids des engins agricoles qui n'est plus pensé en fonction des propriétés du sol. La stabilité et, de là, la sécurité du conducteur sont accrues par un centre de gravité bas et un poids élevé : ces poids nient la réalité des sols que ces engins sont conçus pour traiter, et accroissent à présent les problèmes de portance.



La portance illustre ces propriétés des sols que nous utilisons souvent sans leur accorder guère d'intérêt conscient, ou alors insuffisamment dans les milieux techniques. Nos yeux restent fermés sur ce que nous donnent les sols et ne se dessillent que lorsque ce don s'effondre. Car la résistance et la portance des sols ont leurs limites...

Terminons d'une note plus anecdotique et hédoniste : le sol est doux sous nos pieds. Pendant la covid-19, quand j'ai écrit ce livre, manquant d'exercice car confiné au cœur de Paris, j'ai commencé à courir dans mon quartier, puis plus largement, et encore plus largement... jusqu'à gagner le bois de Vincennes. Trottineur du dimanche, souvent sur bitume, parfois sur les chemins pierreux de Bretagne, je n'avais jamais pu faire la comparaison entre les revêtements urbains et la douceur, l'amorti, la souplesse, la tendreté du sol des sentiers forestiers sous le pied... Quand je commençai à courir dans le bois de Vincennes, mes douleurs articulaires d'après-course s'évanouirent soudain. En courant le long des sites sportifs du bois ou de l'hippodrome, où je ne voyais que terres battues et terrains de sport herbus, je réalisai comment, du cheval à l'homme, une longue sélection naturelle de pieds nus et de sabots non ferrés explique que le sol nous convienne bien mieux qu'aucun enrobé.

Chaussures et fers des animaux domestiques sont des avatars tardifs, largement inventés comme patins pour subir les chocs et l'usure des

routes, des pavés et des trottoirs : certes lisses et dégagés d'obstacles, ceux-ci nous privent du contact avec le sol moelleux sur lequel nous avons évolué. Une course pieds nus dans un pré (et même une chute) sont possibles ; dix minutes sur le bitume (et surtout une chute) vous détruiront au moins la plante des pieds. Humains et animaux sont adaptés à marcher ou à courir sur le sol et il n'est meilleur réceptacle pour nos membres. L'humanité a marché sur la Lune, mais vous, avez-vous essayé au moins une fois de marcher pieds nus sur la Terre ?

POUR CONCLURE...

Nous venons de découvrir la partie solide du sol. Ce n'est pas là médiocre partie de notre environnement : la masse de sol qui nous entoure est énorme. Si on considère qu'un sol a une épaisseur de 30 centimètres, alors cela représente 4 500 tonnes de matériaux par hectare. Mais souvent la roche-mère qui limite par-dessous le sol est bien plus en profondeur. Le chiffre grimpe à 15 000 tonnes par hectare (1 500 kilos par mètre carré) pour un sol épais de 1 mètre, ce qui représente le cas général ! Au moins le propos de ce livre n'est-il pas léger.

La taille des composants de la partie solide, venue de la roche sous-jacente, comprend des blocs, des cailloux et surtout de multiples morceaux de tailles variées inférieures à 2 millimètres. On distingue sous cette limite plusieurs catégories granulométriques, de la plus grande à la plus petite taille : les sables, les limons et les argiles. Chacune a son rôle dans le sol : les sables comme les blocs et les cailloux favorisent le passage de l'eau et de l'air, les limons libèrent des sels minéraux et les argiles aident à les retenir ; enfin, argiles et limons contribuent à retenir l'eau.

Quant à la composition des parties solides, nous avons distingué une partie minérale et une partie organique. Dans la première, qui domine largement en volume, nous avons retrouvé les mots "argile" et "sable" dans un tout autre sens. Ils désignent, en ce second sens, des sortes de minéraux très abondants dans les sols : des phyllosilicates dans le cas des argiles, et du quartz dans le cas du sable. Argiles et sable au sens minéral côtoient, dans les sols, une énorme diversité d'autres minéraux plus rares : d'ailleurs, certains minéraux, comme certaines argiles et les oxydes et hydroxydes de fer, ne se forment que dans les sols.

La partie organique du sol est quant à elle faite à la fois d'organismes vivants, que nous découvrirons plus en détail au chapitre IV, et

de divers restes d'organismes morts, plus ou moins transformés, fragmentés, méconnaissables. Elle comprend notamment des composants minuscules et assez mal connus, dont certains insolubles (l'humine), d'autres solubles lorsque le milieu n'est pas acide (les acides humiques) et d'autres toujours solubles (les acides fulviques). La matière organique ne domine pas dans les sols, où prévaut le minéral : mais sa masse totale est significative, puisque entre 60 et 90 % de toute la biomasse des écosystèmes terrestres, morte et vivante, se trouve là.

Le sol, par sa fraction solide, offre support et ancrage. C'est d'ailleurs le sens commun, bien acté par sa définition : "partie de la croûte terrestre, à l'état naturel ou aménagée, sur laquelle on se tient et se déplace¹". Mais, si le sol évoque fermeté et parfois même matériau de construction, il a une limite de rupture, fortement abaissée en présence d'eau. On découvre ici un trait des sols sur lequel nous reviendrons : leur capacité à résister aux variations et aux contraintes cache d'autant plus leur faiblesse, car ils cèdent à un certain point. En cela, les sols sont des durs au cœur tendre. Ils le sont aussi si l'on considère qu'y dominent des composants minéraux, durs et denses, reliés par la tendreté attachante de la matière organique.

Reste qu'en matière de densité, celle des sols, perforés de multiples trous, reste faible par rapport à celle des roches, souvent deux fois plus denses. Partons à présent à l'exploration de ces lacunes et de leur contenu...

1. Le *Trésor de la langue française* (ou *TLF* pour les intimes) est gratuit, cultivé et passionnant : atilf.atilf.fr/.

II

L'AMBROISIE SOUTERRAINE : DE LA FRACTION LIQUIDE DU SOL

Où l'on commence par noyer un sol ; où des trous remplissent des fonctions variées ; où l'eau de pluie fait le plus souvent demi-tour dans le sol pour retourner dans l'atmosphère ; où la plante est une paille par laquelle l'atmosphère boit le sol à grands traits – chaque jour par dizaines de tonnes à l'hectare de forêt ; où l'on lira des histoires très salées ; où l'on découvre que pour bien amener de l'eau, il faut paradoxalement en enlever, et, plus simplement, pourquoi les pots de fleurs sont troués par en dessous ; et où de beaux sols se meurent en croûtes de sels.

L'Andalousie est parfois surnommée “le jardin de l'Europe” car ses cultures de fruits et de légumes, qui représentent le quart de la production végétale espagnole, inondent à vil prix le marché européen. En vérité, ce jardin fait de dizaines de milliers d'hectares couverts de serres en plastique n'est ni gracieux, ni écoresponsable. Mais il doit tout à la gestion de l'eau, car cette région d'Espagne, assez désertique pour qu'on y tourne les westerns européens, n'est normalement pas si propice à la végétation. L'eau provient des rivières et du sous-sol, dont les civilisations qui se sont succédé là ont progressivement amélioré l'apport aux sols, par ailleurs peu épais. Les Romains édifièrent canaux et aqueducs, en un savoir-faire de déplacement de l'eau selon la gravité qui perdura, plus ou moins bien conservé par les ordres religieux, jusqu'aux invasions arabes. Entre le VIII^e et le XV^e siècle, la domination arabe raffina les pratiques au-delà de l'entretien, par exemple avec l'introduction de la roue à godets, ou noria, qui remonte l'eau grâce à une traction animale. Aujourd'hui, forages profonds et pompes décuplent l'intensité de l'irrigation : ainsi, l'eau fait la richesse du sol et la croissance des plantes.

Mais où va l'eau dans le sol et pourquoi en fait-elle la fertilité ? D'abord, notons qu'il y a de la place pour elle dans le sol : allez chercher ce petit morceau de sol qui vous attend dans la cuisine depuis le début du chapitre précédent. Remplissez d'eau un saladier ou un seau, plus grand que votre morceau, puis jetez-y le sol : vous verrez des bulles sortir... Il existe donc des trous qui de surcroît sont assez jointifs, car l'air y circule avant de sortir. On appelle "porosité" ces trous, plus ou moins tissés en réseau. Habituellement, ils contiennent aussi un peu d'eau : peut-être aviez-vous d'ailleurs remarqué une humidité, en ramassant le sol... Le chapitre précédent, entre glissements de terrain, embourbements et maisons détruites par les sols argileux plus ou moins gonflés d'eau, nous avait d'ailleurs préparés à la présence d'eau dans le sol.

Dans ce chapitre, nous explorerons les trous du sol où peut se loger l'eau et la façon dont elle se comporte dans ces pores qui la retiennent, ou pas. Nous verrons comment les racines des plantes l'exploitent et, au passage, nous découvrirons les règles qui régissent la circulation de l'eau. Puis nous verrons comment l'eau du sol peut retourner, par évaporation ou par les plantes, vers l'atmosphère. Nous découvrirons comment l'eau du sol charrie des sels minéraux, souvent vitaux pour les plantes. Nous ne serons jamais loin des pratiques agricoles et cela nous amènera finalement à parler de l'irrigation et des risques de salinisation des sols.

DES PETITS TROUS, ET DES PLUS PETITS TROUS...

La porosité du sol est importante pour la circulation de l'eau, tout comme pour celle des gaz que nous détaillerons au chapitre v. Les pores du sol sont de tailles variables et d'autant plus grands qu'il existe, nous l'avons vu plus haut, des éléments grossiers, blocs, cailloux ou sables, qui forment de plus larges espaces entre eux. Ils sont d'autant plus ouverts que le sol est peu tassé. Ces pores se divisent en deux catégories. Les plus grands, ou macropores (du grec *macros*, grand), laissent entrer et s'écouler l'eau sans la retenir. Les plus petits ou micropores (du grec *micros*, petit) retiennent l'eau par capillarité, une force physique qui mérite un instant d'attention et d'illustration. Commençons par des observations simples. Saisissez-vous d'une boisson chaude non sucrée mais colorée (café, thé ou infusion), d'un mouchoir en papier et d'un morceau de sucre. C'est bon ?

Plongez un coin du mouchoir dans le liquide, juste quelques millimètres : tout de suite le liquide coloré pénètre dans le papier et monte sur un centimètre ou plus ! Plongez maintenant une extrémité du morceau de sucre : de nouveau, le liquide monte dans le sucre... qui s'effrite en fondant – zut, vous avez les doigts qui collent à présent : laissez le sucre sombrer dans le liquide. Justement, vous avez un mouchoir pour vous essuyer : c'est encore pareil, le jus collant de vos doigts est bu par le papier. Vous venez de réaliser que l'eau est chaque fois montée, attirée... alors qu'habituellement, elle s'écoule par gravité vers le bas. La force qui a aspiré l'eau, c'est la capillarité, due aux petits trous entre les cristaux de sucre ou entre les fibres du mouchoir qui retiennent l'eau. Les médecins me diront que, dans ces deux cas, d'autres forces agissent aussi, mais qu'ils patientent, nous y reviendrons plus bas : la capillarité agit en majeure partie. Au fait, votre boisson chaude et maintenant sucrée va refroidir : vous pouvez la boire !

Les forces capillaires sont celles qui, pour faire simple, attirent l'eau dans de petits trous bordés par des substances (sucre, coton, matière organique ou argile du sol) qui interagissent bien avec les molécules d'eau, en d'autres termes sont hydrophiles. La force capillaire dépend de la taille des trous : s'ils sont trop grands, elle est nulle et l'eau n'est pas retenue. Les macropores n'exercent aucune force capillaire et ne retiennent pas l'eau. Si les trous sont plus petits, ils peuvent retenir l'eau : ce sont les micropores qui la retiennent d'autant plus fortement qu'ils sont petits. Quand vous avez fait une tache sur un vêtement, en appliquant très fort un mouchoir en papier (dont les pores sont plus petits que ceux de l'étoffe), vous parvenez souvent à ôter une partie du liquide tachant... C'est aussi ce qui fait l'efficacité d'essuyage des serviettes microporeuses (ou à microfibrilles), dont les minuscules pores attirent avec avidité l'eau ; cela explique le caractère détachant des argiles de la terre de Sommières, évoquée au chapitre précédent, qui absorbent les liquides colorés.

À chaque taille une affinité différente pour l'eau – alors, que préférer pour un sol ? Ici encore, comme en matière de granulométrie, nulle préférence : il faut de tout un peu. Les macropores se vident rapidement et, le plus souvent remplis d'air, ils permettent la respiration. Les micropores, quant à eux, retiennent l'eau, ce qui est bon pour la vie du sol aussi qui a besoin d'eau en continu, et pas seulement quand elle passe après une pluie ! Grâce aux micropores, le sol fonctionne en éponge.

L'EAU DU SOL DANS TOUS SES ÉTATS

Retournez dans la cuisine, reprenez le saladier qui vous a servi précédemment et une éponge toute sèche. Remplissez de nouveau le saladier et regardez bien, les yeux dans ses trous, votre éponge : elle a des lacunes de toutes tailles, comme dans un sol ! Nous allons l'utiliser pour comprendre les états de l'eau dans le sol. Laissez maintenant l'éponge se gorger d'eau dans le saladier, quitte à la presser pour en expulser l'air résiduel. C'est fini, elle flotte entre deux eaux, gorgée de liquide ? Macropores et micropores sont remplis et toute la porosité est saturée d'eau. Sur un cube de sol, on peut calculer le volume d'eau retenu par kilogramme (ou par litre) : c'est ce qu'on appelle "la capacité de saturation".

Retirons l'éponge de l'eau et suspendons-la au-dessus du saladier : l'eau s'en écoule car les macropores se vident. On remarque que cela prend du temps car la connexion entre les macropores est parfois indirecte, compliquée, il y a des goulets d'étranglement du flux entre eux, dont certains communiquent moins bien avec les autres. Pareillement, dans le sol, une partie de la rétention d'eau, à court terme après une pluie, est liée au temps d'écoulement dans les macropores. Regardez votre éponge : cela n'en finit pas de couler. Il sort de moins en moins d'eau, bientôt c'est du goutte-à-goutte, mais il reste quelques macropores qui se vident encore et encore, tardivement. Les vitesses de circulation de l'eau varient selon la géométrie et la taille de la porosité du sol : par exemple, elles valent entre 1 et 100 centimètres par heure en sol sableux ou limoneux et chutent au-dessous de 1 millimètre par heure dans les sols argileux.

Les pédologues qui étudient la microporosité ont arrêté un standard : ils attendent quarante-huit heures d'égouttement pour arriver à un point dit "de ressuyage", où tous les macropores sont réputés vides tandis que tous les micropores restent pleins. On peut alors calculer le volume d'eau retenu par kilogramme (ou par litre) de sol : c'est ce qu'on appelle "la capacité au champ", qui occupe les micropores seulement. Elle est plus grande dans des sols argileux (entre les particules desquels il y a de nombreux petits trous) que dans les sols limoneux (moins de petits trous) et bien plus que dans les sols sableux qui, en l'absence de petits trous, laissent presque complètement s'échapper l'eau. Les sols à capacité au champ nulle sont dits "filtrants", comme ceux des dunes du littoral ! Un sol argilo-calcaire retient par exemple 300 grammes d'eau par kilogramme de sol.

Ces considérations ont une conséquence importante pour l'irrigation et pour l'arrosage raisonné du potager : apporter de l'eau, c'est remplir les micropores, mais pas au-delà car ce qui remplit les macropores se ressuie plus ou moins vite, et donc sera perdu. On devine qu'il faut apporter plus souvent de l'eau à un sol sableux (où il y a peu de micropores, répétons-le) qu'à un sol limoneux ou argileux, dont les abondants micropores autorisent de bonnes réserves en eau.

LES ÉTATS DE L'EAU DU SOL ET LA PLANTE

Maintenant, considérons le point de vue d'une plante qui consomme l'eau du sol. L'eau des macropores est aisément disponible ; toutefois, le temps passant après une pluie, le sol arrive au point de ressuyage. La plante doit alors vaincre les forces capillaires qui retiennent l'eau dans le sol : elle doit l'aspirer (nous verrons ensuite comment). Faisons un parallèle avec vous et l'eau de l'éponge : au point de ressuyage, l'eau est retenue dans les micropores et vous créez une dépression relative entre l'intérieur et l'extérieur en appuyant sur l'éponge pour l'essorer. C'est un peu différent car la plante aspire l'eau, tandis que vous l'exprimez, mais enfin : l'eau coule, car vous ou la plante vainquez les forces capillaires. Plus vous appuyez, plus vous contrez des forces capillaires élevées. Plus une plante exerce de succion, plus les micropores dont elle extrait l'eau sont petits.

Tout cela a une fin, quand il ne reste plus d'eau que dans des petits micropores qui la retiennent très fortement. Rapidement, vous peinez à extraire l'eau : ça fait mal aux mains de presser l'éponge, et pourtant il y reste de l'eau. De même, quand la teneur en eau du sol diminue, la plante commence à ne plus pouvoir la mobiliser : on arrive au point de flétrissement réversible. La quantité d'eau restant au point de flétrissement réversible varie d'un sol à l'autre mais, pour une plante donnée, le manque d'eau accessible se manifeste par un début de flétrissement : cette souffrance physiologique est toutefois parfaitement réversible si l'eau revient. Sinon, comme l'extraction du peu d'eau restant continue, vient le moment où plus rien du tout ne sort de l'éponge. Pour la plante arrive le moment où l'eau ne rentre plus, ce dont elle ne se remettra pas : c'est le point de flétrissement permanent. La quantité d'eau restant au point de flétrissement permanent varie d'un sol à l'autre.

Les points de flétrissement réversible et permanent ne dépendent pas du sol (à l'inverse des capacités de saturation et au champ), mais de la plante étudiée elle-même. Une autre plante, de la même espèce ou surtout d'une autre espèce, aura un point de flétrissement différent (y compris sur le même sol), car cela résulte de données physiologiques propres à chaque organisme. De même pour votre éponge dont vous ne sortez plus d'eau : quelqu'un à la poigne plus forte que vous pourrait encore en sortir un peu.

Ces considérations ont une conséquence majeure pour l'irrigation et l'arrosage : apporter de l'eau au sol, c'est remplir les micropores "utilisables" par la plante, chaque fois qu'on frôle le point de flétrissement réversible. Pas la peine d'en mettre plus que la capacité au champ, ce serait perdu. Pour une culture donnée, la quantité d'eau des micropores utilisable, c'est-à-dire comprise entre la capacité au champ et le point de flétrissement permanent, s'appelle la "réserve utilisable". Mais comme on veut éviter le flétrissement, même réversible, on vise plutôt la "réserve facilement utilisable", c'est-à-dire la quantité d'eau comprise entre la capacité au champ et le point de flétrissement réversible. Gérer l'eau d'un sol, c'est rester au-dessus du point de flétrissement réversible et au-dessous de la capacité au champ – ce qui peut se suivre, à l'aide de sondes dans le sol ou avec l'habitude du cultivateur. Bien sûr, c'est aussi, dans un sol et un climat donnés, choisir les plantes qui ont un point de flétrissement adapté, pour limiter les besoins d'irrigation : dans le Bassin aquitain, on peut mettre en question la plantation de maïs qui exige d'être irrigué chaque année...

LES LOIS DU CHEMINEMENT DE L'EAU DANS LE SOL

Avant d'aller plus loin dans les échanges d'eau entre le sol et la plante, revenons sur ce qui met en mouvement l'eau venue par la pluie, non seulement dans le sol, mais également partout ailleurs, y compris dans les plantes. Premier paramètre évident : la pression (ou son contraire, la dépression). L'eau circule de la plus forte vers la plus basse pression : c'est ainsi que, quand on ouvre le robinet, elle s'écoule du château d'eau à votre évier ; ou que, quand vous l'aspirez dans une paille, votre cocktail monte. La capillarité est une dépression qui aspire vers les micropores.

Deuxième paramètre : l'eau se déplace du milieu le moins concentré vers le milieu le plus concentré. Il y a des éléments en solution dans

l'eau et la circulation de celle-ci tend à équilibrer leurs concentrations. Par exemple, quand on renverse un liquide sur une nappe, verser un peu de sel de cuisine dessus l'attire, car il est plus concentré hors de la nappe que dedans. L'observation réalisée plus haut avec le sucre plongé dans le café s'expliquait donc aussi par le fait que le morceau de sucre est plus concentré (en sucre !) que le liquide.

Troisième paramètre : il y a des milieux dits "hydrophiles" où l'eau se trouve stabilisée, reliée et retenue par ses interactions avec les constituants. C'est le cas de la cellulose, comme celle du coton hydrophile, et l'exemple du mouchoir plongé dans le café, plus haut, s'expliquait aussi par l'affinité de l'eau pour la cellulose du mouchoir.

Le comportement de l'eau venue par la pluie dans le sol s'explique par l'ensemble de ces paramètres¹, surtout le premier et le dernier. La pression, d'abord : dans la macroporosité, l'eau circule selon la gravité, vers les plus basses pressions, c'est-à-dire vers le bas ; dans les microporosités, elle est attirée par les forces capillaires et l'un des intérêts des argiles et des limons est de ménager de nombreux micropores. Mais des composants hydrophiles peuvent la retenir : en particulier, plus le sol contient de matière organique, qui est globalement hydrophile, plus il retient d'eau. De plus, cette eau-là fait le plus fréquemment partie de la réserve facilement utilisable. On comprend ici l'un des intérêts d'apporter de la matière organique au sol : la matière organique du sol peut retenir jusqu'à 90 % de son poids en humidité !

Les sols ont donc un double rôle régulateur après une pluie : l'eau s'y infiltre et transite lentement car les macropores sont peu jointifs et, même s'ils le sont, l'eau ne circule dans le sol qu'avec peine, à une vitesse bien inférieure au mètre par heure. De plus, une partie de l'eau est retenue dans les micropores et par la matière organique. L'eau arrive donc avec retard aux rivières, ce qui étale les crues ; lentement relâchée des sols, elle parvient aux rivières bien après les pluies, ce qui limite ou retarde les étiages des rivières. Dans le désert par exemple, sans sol et donc sans végétation, on observe des dynamiques d'oueds : des torrents et des inondations violents après les pluies, puis plus aucun ruissellement jusqu'aux précipitations suivantes. Le débit sage des rivières doit vous faire penser aux sols en bonne santé qui le régulent... tandis

1. La résultante de ces trois paramètres combinés est appelée techniquement "potentiel hydrique". Celui-ci se mesure comme une pression, car les trois paramètres sont eux-mêmes exprimés en bars.

qu'inversement la couverture des sols par une urbanisation galopante contribue aux inondations.

Allons un instant dans le Sud-Est des Alpes, sur le site expérimental de Draix qui offre des pentes vives, taillées dans des roches molles soumises à une érosion si forte qu'elle interdit l'implantation des végétaux. Là a été expérimenté, en grandeur naturelle dans les années 1980-1990, l'effet de la végétalisation et de la recréation d'un sol forcées par l'homme : l'intensité des crues est divisée par 10 et leur maximum après les pluies, retardé d'une bonne demi-heure ; l'eau arrache et transporte moins de matière : une couverture de 40 % des surfaces réduit de moitié au moins la quantité de matériaux transportés !

La rétention des précipitations par la matière organique de sols très particuliers permet l'approvisionnement hydrique de grandes villes des Andes comme Quito, Bogota ou Mérida. Au-dessus d'elles, à des altitudes allant de 3 500 mètres jusqu'aux premières neiges éternelles, à 5 000 mètres, se trouvent des écosystèmes particuliers, les paramos (de l'espagnol *paramo*, lande), dont on trouve des équivalents dans les montagnes tropicales d'Afrique de l'Est et de Nouvelle-Guinée. Leurs sols sont extrêmement riches en matière organique peu dégradable par elle-même (car elle est mélangée de fer et d'aluminium libérés par les roches-mères volcaniques sous-jacentes) et à cause de la fraîcheur du climat qui limite l'activité microbienne : elle représente de 10 à 40 % du volume du sol, soit jusqu'à 1 500 tonnes par hectare ! Les altitudes concernées entraînent des précipitations par condensation et, entre micropores et matière organique, ces sols sont des éponges contenant jusqu'à plus de 3 fois leur poids d'eau : ce sont de véritables gelées, mi-eau, mi-solide ! Ces sols étonnants alimentent des rivières aux débits élevés et stables en aval : irrigation agricole, hydroélectricité et approvisionnement des villes sont possibles toute l'année à plus basse altitude ! Aujourd'hui, le changement climatique, l'extension des cultures en altitude et le surpâturage dégradent les paramos et mettent en péril ces châteaux d'eau naturels, qui avaient pourtant permis le développement de zones très peuplées.

LES CHEMINS (ET LES DEMI-TOURS) DE L'EAU DANS LE SOL

Dans le sol, la gravité a un effet dominant : l'eau apportée par les pluies, puis infiltrée, circule de macropore en macropore, toujours plus vers le bas. Quand elle arrive à la roche-mère, elle peut s'infiltrer dans celle-ci