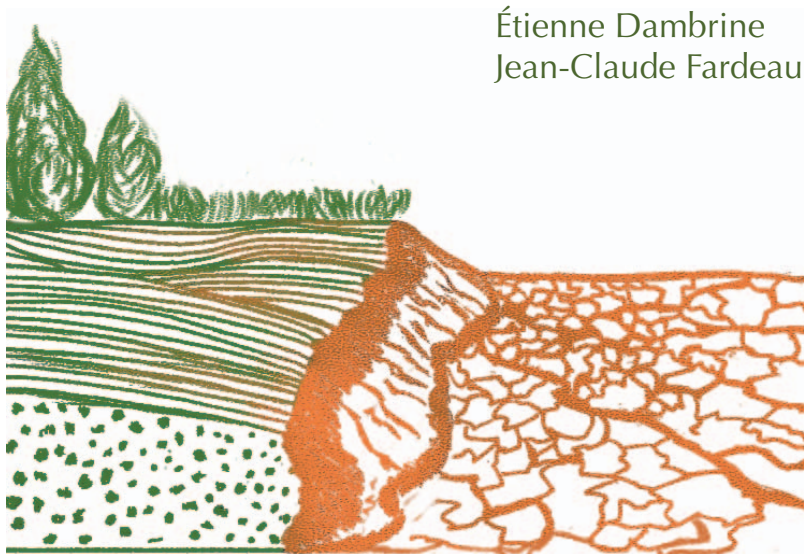


80 CLÉS POUR COMPRENDRE LES SOLS

Jérôme Balesdent
Étienne Dambrine
Jean-Claude Fardeau



éditions
Quæ

80 clés pour comprendre **les sols**

Jérôme Balesdent, Étienne Dambrine,
Jean-Claude Fardeau

éditions
Quæ

Les auteurs

Jérôme Balesdent était ingénieur agronome, pédologue, docteur en sciences du sol et directeur de recherche à l'Inra d'Aix-en-Provence. Ses travaux portaient sur les matières organiques, l'écologie microbienne, les cycles biogéochimiques et l'évolution des sols.

Étienne Dambrine est pédologue, auteur d'une thèse sur les sols de haute montagne. Il a développé des recherches sur les cycles biogéochimiques dans les écosystèmes forestiers et lacustres, à l'Inra et à l'Université de Savoie.

Jean-Claude Fardeau était ingénieur agronome et docteur en sciences du sol. Chercheur au CEA et à l'Inra, pionnier des méthodes de la radio-agronomie, il est mondialement connu pour ses recherches sur la disponibilité des éléments minéraux.

*Jérôme Balesdent est décédé avant la réédition de cet ouvrage.
Ce livre perpétue sa mémoire.*

Cet ouvrage a fait l'objet d'une première publication, illustrée, en 2015, dans la collection Clés pour comprendre.

© Éditions Quæ, 2023

ISBN papier : 978-2-7592-3826-2

ISBN PDF : 978-2-7592-3827-9

ISBN ePub : 978-2-7592-3828-6

Éditions Quæ

RD 10, 78026 Versailles Cedex

Le code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique. Toute reproduction, partielle ou totale, du présent ouvrage est interdite sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

Sommaire

Introduction	5
Chapitre 1. Entre sol et sous-sol.....	9
1. Qu'est-ce qu'un sol ?	9
2. De quoi le sol est-il constitué ?.....	10
3. Combien de temps faut-il pour former un sol ?	14
4. Sable, graviers et rochers font-ils partie du sol ?.....	15
5. Comment se fabrique un sol ?.....	16
6. Tous les sols se ressemblent-ils ?	18
7. Quel pH a le sol ?	19
8. Les sols ont-ils des noms ?.....	20
9. Comment le sol peut-il devenir pierre ?	21
10. Qu'est-ce que les argiles ont de si particulier ?.....	23
11. Le sol est-il plus riche en minéraux ou en matière organique ?	25
12. Comment le sol retient-il les éléments nutritifs ?.....	26
13. Que fait l'eau dans un sol ?	27
14. La Terre manque-t-elle d'eau ?	29
15. Y a-t-il des terres salées ?	31
16. Quels trésors recèlent les puits ?	34
17. Y a-t-il de la Terre dans l'espace ?	36
18. Où sont passées les météorites ?	37
19. En quoi les sols lunaires sont-ils différents des sols terriens ?	38
20. À quoi nous servent les sols ?	39
Chapitre 2. Le sol vivant	43
21. Qu'est-ce qui grouille et fossoie dans les sols ?.....	43
22. Les habitants du sol sont-ils paisibles ?.....	45
23. Quelles bactéries trouve-t-on dans les sols ?.....	47
24. Qui a la plus belle maison de terre ?.....	49
25. Qui fait les plus gros terriers ?	50
26. Pourquoi les oiseaux avalent-ils des cailloux ?.....	51
27. Quel est le plus grand organisme vivant sur Terre ?	52
28. À quoi sert le sol pour une plante ?	53
29. Les champignons font-ils pousser la forêt ?	55
30. Y a-t-il plus de racines ou de champignons dans le sol ?.....	56
31. Jusqu'où vont les racines des arbres ?.....	57
32. Comment le pin et le châtaignier poussent-ils sur les sols pauvres ?.....	58
33. D'où vient l'humus des forêts ?	58
34. Les matières organiques se renouvellent-elles ?	59
35. Les lichens ont-ils inventé le sol ?.....	61
36. Des déserts bien vivants ?.....	62
37. Les sols peuvent-ils digérer nos déchets ?.....	63
38. Les plantes peuvent-elles vraiment dépolluer des sols ?.....	65
39. Les champs maudits sont-ils un mythe ?	67
40. Peut-on manger de la terre ?.....	68
41. Vers une empreinte génétique des sols ?	69

Chapitre 3. Sol et agriculture	73
42. Comment les alluvions ont-elles nourri les anciennes civilisations ?	73
43. À quels sols doit-on les « greniers à blé » ?	76
44. Où se trouve le sol le plus riche du monde ?	79
45. Le maïs peut-il pousser n'importe où ?	80
46. Depuis quand se pratique la rotation de cultures ?	84
47. L'alternance des cultures est-elle nécessaire à la terre ?	85
48. Pourquoi cultiver plusieurs espèces en même temps ?	88
49. Les vers de terre ont-ils déserté nos champs ?	89
50. Comment la luzerne et le trèfle peuvent-ils enrichir la terre ?	91
51. Les tracteurs sont-ils trop lourds ?	93
52. Est-il vraiment nécessaire de labourer ?	95
53. Quels sont les impacts des haies végétales ?	97
54. L'agriculture peut-elle vivre sans fertilisants ?	99
55. Faut-il fertiliser la forêt ?	101
56. Où vont les pesticides ?	103
57. Les pesticides empoisonnent-ils la terre ?	106
58. Apporte-t-on trop d'azote aux sols ?	108
59. Pourquoi la disponibilité du phosphore est-elle cruciale ?	110
60. Quels sont les enjeux de l'agriculture écologiquement intensive ?	111
61. Fatigue des sols : mythe ou réalité ?	113
Chapitre 4. Sol, risques et climat	115
62. Pourquoi recevons-nous la poussière du Sahara ?	115
63. Le sol fabrique-t-il l'atmosphère ?	117
64. Le sol peut-il influencer le climat de notre planète ?	119
65. Comment le changement climatique va-t-il influencer nos sols ?	121
66. Que se passe-t-il s'il y a trop d'eau dans les sols ?	123
67. Le sol est-il un puits de carbone ?	125
68. Pourquoi l'érosion est-elle plus forte aujourd'hui ?	127
69. Comment conserver le sol ?	129
70. Radioactif, le sol ?	131
71. Pourquoi le sol de la forêt amazonienne est-il si fragile ?	134
72. L'acidité des sols réduit-elle la biodiversité ?	135
73. Les sols sont-ils sédentaires ?	137
Chapitre 5. Les métamorphoses du sol	139
74. Qui incarne la fertilité des sols ?	139
75. Comment fabrique-t-on les maisons de terre ?	140
76. Existe-t-il des sols vierges ?	141
77. La terre porte-t-elle des verres ?	143
78. Quels sont les secrets du pot de terre ?	145
79. Les sols ont-ils de la mémoire ?	147
80. Vers une culture hors sol ?	149
Post-scriptum	152
Bibliographie	153
Crédits iconographiques	155

Introduction

Questionner le sol, n'est-ce pas lui reconnaître sa place d'être vivant à part entière, et pas seulement celle d'un bien, d'un moyen, d'un matériau ou d'une ressource ? Nos sols ont été et sont encore pour beaucoup comme un parent proche, tendre et rebelle, fidèle et capricieux, sensible, odorant ou malodorant, sain, mais parfois malade... Il s'éduque, s'engraisse, se cultive, se retourne, se relève, s'épuise, se perd... Terriens nous sommes, et produits d'un terroir. Ou nous l'étions...

Le sol source de vie est présent dans nos mythes fondateurs, nos religions, notre culture. Parce que l'agriculture alimente depuis plus de dix mille ans nos sociétés, et que la fertilité du sol conditionne la production alimentaire, son affaiblissement ébranle les civilisations. Jean Boulaïne attribuait ainsi à l'épuisement des sols en phosphore la stagnation des rendements céréaliers qui avaient conduit au déclenchement de la Révolution française. Jared Diamond, dans son ouvrage *Collapse*, montre que les civilisations de l'île de Pâques et des Mayas s'effondrent lorsque les sols sont épuisés. Bien sûr, les causes en sont multiples.

Le sol est une surface que l'on peut vendre et acheter et un volume que l'on peut mettre en valeur. Arpenteurs, notaires, géographes, juristes sont les métiers de la surface. Le volume est l'affaire des pédologues, cette sorte de prospecteur-cartographe des propriétés des sols, des agronomes, qui se préoccupent de la mise en valeur des sols à des fins agricoles, et plus généralement des scientifiques des sols, qui étudient l'ensemble de leurs propriétés comme le produit d'une interaction complexe entre roche, relief, climat, biocénoses, temps (la durée) et l'homme. Évidemment, le prix de la surface donné par le notaire, ou estimé par un État qui loue ses terres, devrait dépendre du potentiel de production estimé par l'agronome, des propriétés intrinsèques analysées par les scientifiques des sols. Mais pas seulement. On roule et on bâtit sur la surface, l'eau sourd du volume... le cultivateur n'est pas le seul utilisateur du sol. Ces usages multiples, c'est aussi l'affaire de l'économiste.

En France, la surface a une valeur et le volume n'en aurait presque pas, ou plus. Placez un panneau « Terre à vendre » devant votre maison, personne ne viendra ; presque partout, il vous faudra la donner pour ne pas la perdre. Pourtant, il s'agit d'une ressource indispensable, non renouvelable à court et moyen terme. Quel paradoxe ! Un autre : dans tel vignoble

d'une zone d'appellation d'origine contrôlée très cotée du Sud-Ouest, les propriétaires, constatant l'état de dégradation avancé des sols de quelque parcelle, l'ont dégarnie de sa partie supérieure et remplacée par une terre de meilleure qualité prélevée à faible distance dans une zone peu cotée. Nos sols seraient-ils une survivance périmée, une valeur marginale, un simple support mécanique à des spéculations ? Ailleurs, dans des pays plus pauvres et moins peuplés, où surface et mise en valeur ne coûtent rien ou presque, des compagnies privées (qui peuvent être les nôtres) voire des États achètent d'immenses surfaces, et l'usage qu'ils en font contraint les sociétés locales et conditionne leur devenir.

Dans le même temps, l'Union européenne répertorie huit menaces les plus importantes pour les sols, contre lesquelles il faut lutter : érosion, tassement, salinisation, perte de matières organiques, perte de biodiversité, contamination, imperméabilisation, inondations et glissements de terrains.

Dans le vaste débat qui lie l'augmentation des gaz à effets de serre et les changements climatiques, le sol occupe une place centrale, car, suivant la manière dont il est géré, il peut accumuler ou déstocker une masse considérable de matière organique, c'est-à-dire de CO₂. Or cette matière organique soutient sa fertilité et alimente l'extraordinaire diversité des organismes qui l'habitent.

Tous ces enjeux environnementaux seraient-ils liés, et pourrait-on gagner sur tous les tableaux ? Globalement, oui. Localement... pas nécessairement. La vigne aime les sols pierreux, les carottes le sable, les villes le bitume... et nous aimons les trois ! L'imagination n'est pas interdite : on pourrait mettre les carottes sur les toits et les vignes sur les gravats ! Mais si l'on veut alimenter une population mondiale croissante, il faudra bien protéger nos meilleures terres à céréales. Et nos exigences justifiées de qualité de vie ne peuvent s'accommoder de sols pollués, maltraités, car ceux-ci conditionnent la qualité de nos produits, donc de notre santé, mais aussi, et c'est essentiel, notre plaisir de savourer. Devant ces enjeux immenses et de grande actualité, les polémiques et les opinions manichéennes ont tendance à prendre le dessus sur l'analyse et l'éclairage des choix : « les sols sont morts » ; « l'agriculture biologique ne peut pas nourrir la planète » ; « les sols sont malades ou pollués »... Le but premier de cet ouvrage est de donner à chacun quelques connaissances de base, en particulier physiques, biologiques, écologiques, indispensables pour suivre ces débats, ou tout simplement pour le plaisir de découvrir ce monde caché merveilleux qu'est le sol.

Ce petit livre est écrit par trois compagnons de longue date de la science des sols. Jean-Claude a cassé son soc juste avant la fin de son sillon, Jérôme et Étienne l'ont complété, sans changer de coutre, en réglant un peu le versoir. Véronique Leclerc et Sylvie Blanchard nous ont sollicités, guidés, relancés, mis en pages et en images avec constance et doigté. Nous les remercions très chaleureusement.

Chapitre 1

Entre sol et sous-sol

1. Qu'est-ce qu'un sol ?

De façon générale, c'est la surface de la terre, sur laquelle nous évoluons. Le mot sol peut prendre des significations différentes selon celui qui en parle. Pour l'architecte, ce sera le plancher, construit ou aménagé pour notre circulation. Pour l'économiste ou le juriste, ce sera un bien, dit foncier : un espace de terrain ou de territoire, régi par des droits et sujet à diverses utilisations. Le sol qui nous intéresse ici est ce qu'il y a sous cette surface : c'est le sol des naturalistes. Il s'agit d'une couche de quelques décimètres à plusieurs mètres d'épaisseur, formée par l'interaction entre la roche (la lithosphère), l'air et les précipitations (l'atmosphère) et les organismes vivants (la biosphère). C'est un milieu unique, à la fois matériau et monde vivant. On peut faire un parallèle avec l'autre grande surface de notre planète, l'océan. Ce terme désigne à la fois la surface sur laquelle se déplacent les bateaux et qui est représentée sur les cartes, et toute la couche d'eau qui est en dessous, avec ce qu'elle contient – algues, poissons, etc. – et ce qui s'y passe – sa biologie, ses échanges physiques et chimiques. Sur les continents, il a aussi tout un monde sous nos pieds : le sol. Il est moins épais que son frère salé, mais tout aussi riche. Bien que familier, il reste mystérieux et nous fournit bien des services.

Depuis quand étudie-t-on les sols ?

Les agronomes de l'Antiquité chinoise, romaine ou du Moyen Âge arabe témoignent, dans leurs traités, d'observation des sols et de savoir-faire empiriques qu'ils en ont tirés. De réelles études scientifiques sont aussi rapportées par des savants de la Renaissance comme Bernard Palissy, céramiste, géologue et agronome. Mais l'avènement de la chimie, entre 1770 et 1800, a constitué un événement majeur. Lavoisier énonça les principes de la conservation de la matière et, en grand agronome expérimentateur, expliqua les grandes lignes du fonctionnement du système eau-sol-plante-atmosphère. Dans la foulée, la découverte, à la suite de travaux comme ceux de l'Anglais Priestley, que les plantes prélèvent leur carbone dans l'atmosphère et non pas dans le sol met fin à la théorie selon laquelle l'humus était à l'origine de la matière végétale, théorie qui avait régné de l'Antiquité romaine jusqu'au début du XIX^e siècle.

L'agronomie moderne, complétée par les découvertes microbiologiques de Pasteur, s'est ensuite développée considérablement tout au long du XIX^e siècle. Un autre grand tournant a eu lieu à la fin de ce siècle : des scientifiques, comme E.W. Hilgard aux États-Unis et Vassili Dokoutchaev en Russie, analysent le sol selon une approche intégrée, non plus comme un matériau géologique, mais comme une entité, résultant d'une genèse et d'une évolution propre, distribuée dans l'espace en fonction des caractéristiques de la géologie, de la végétation et du climat. Ils sont les véritables pères de la science moderne des sols, la pédologie. Philippe Duchaufour (1912-2000) et Jean Boulaine (1922-2012) furent de grands pédologues français ; on doit d'ailleurs à ce dernier une remarquable Histoire des pédologues et de la science des sols.

2. De quoi le sol est-il constitué ?

D'abord de minéraux. Il y a ceux des roches qui ne sont pas encore transformés, mais simplement libérés par une désagrégation chimique ou physique comme l'action du gel. On parle de « minéraux primaires » : les grains de quartz, de feldspath, de mica ou bien de pyroxène provenant des granites ou des laves. Ce sont les plus gros morceaux dans les sols : leurs tailles vont de quelques centièmes de mm à quelques mm de diamètre. Et puis il y a des

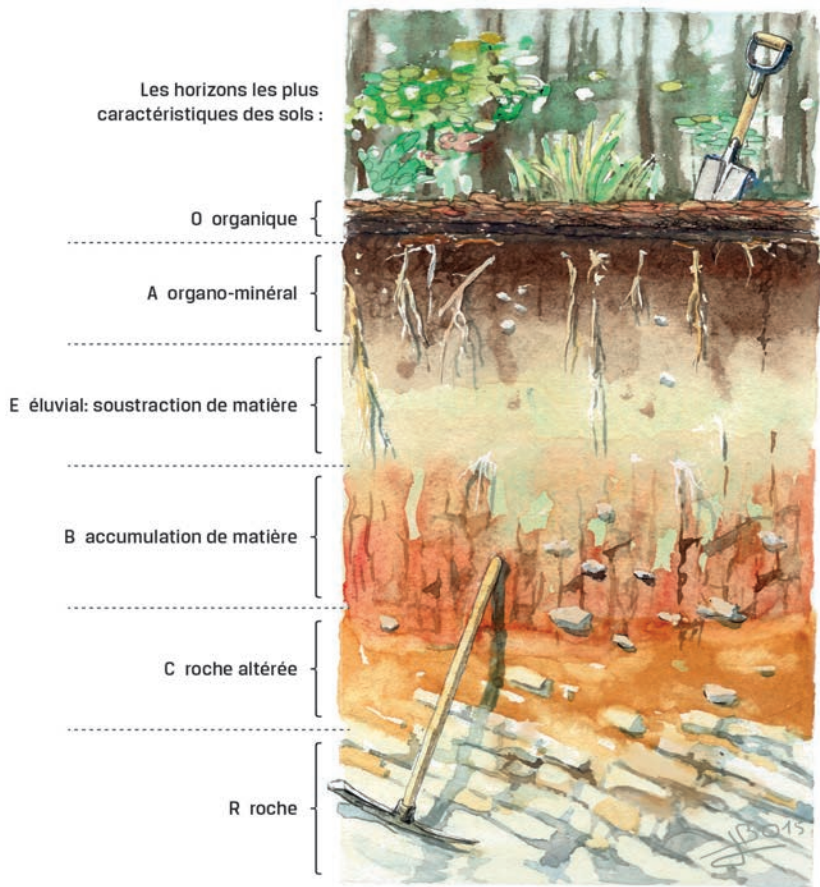
minéraux secondaires, qui se sont formés dans les sols eux-mêmes à partir des premiers, sous l'action de la pluie et de l'oxygène de l'air, des acides et du gaz carbonique libérés par les plantes et les microorganismes. Les plus précieux sont les argiles. Ils sont faits des atomes de silicium et d'aluminium de la roche, combinés avec l'oxygène et l'hydrogène de l'eau, réorganisés en feuilles de quelques millièmes de millimètre d'épaisseur et, au plus, de millièmes de mm de longueur. D'autres constituants secondaires sont les oxydes et hydroxydes du fer et de l'aluminium, termes ultimes de l'oxydation des minéraux au contact de l'atmosphère. Le fer des roches rouille, ce qui donne aux sols leurs belles couleurs jaunes, marron, orange ou rouges. Beaucoup de roches dites sédimentaires comme les schistes, les argiles, les marnes et les calcaires contiennent déjà ces minéraux secondaires, issus de l'érosion de sols anciens. Une fois ces roches émergées, ces minéraux seront repris dans un nouveau cycle de formation des sols.

Ensuite il y a les matières organiques. Les organismes vivants et morts, ainsi que les microbes qui les décomposent, libèrent dans le sol les briques élémentaires de leurs molécules : acides aminés, sucres, lipides, composés phénoliques, etc. Ces molécules s'associent entre elles par des liaisons faibles pour former des structures supramoléculaires : les composés humiques (de humus, « la terre », en latin). Elles peuvent également se lier aux argiles et former des associations organo-minérales. Les matières organiques aussi ont une réactivité extraordinaire. Elles lient les minéraux entre eux et retiennent de nombreux éléments nutritifs.

Autres contenus du sol : de l'eau et des solutions. Elles contiennent calcium, magnésium, potassium, sodium, ammonium, chlorures, sulfates, bicarbonates, nitrates, qu'elles vont transporter vers les rivières ou les racines des plantes.

Mais ce n'est pas tout, car un sol comprend aussi les organismes qui y vivent : racines, champignons, bactéries et invertébrés.

Tous ces composants sont organisés en couches que l'on nomme horizons, qui se sont formées lors du développement du sol. Il y a un grand nombre de types d'horizons différents, mais on rencontre assez fréquemment une succession, de haut en bas, d'horizon O (organiques), A (organo-minéraux), E (pour « éluviation ») appauvris en argiles ou oxydes, B d'accumulation d'argiles, d'oxydes ou d'autres composants, S ou C d'altération de la roche, et R de roche dure non altérée.



Un exemple des constituants d'un sol

Dans un cube de 1 m × 1 m × 1 m d'un sol sur limon du bassin parisien (luvisol), sous prairie, un petit matin de printemps, il y a :

- 520 litres de solide
- + 480 litres de vide, remplis ce jour-là de 320 litres d'eau et 160 litres d'air.

.../...

.../...

- **Soit 1 350 kg de solides, faits de :**
 - **1 325 kg de minéraux**
 - 920 kg de grains de quartz
 - 280 kg d'argiles kaolinite, illite, chlorite, vermiculite, montmorillinite et d'autres interstratifiés
 - 50 kg de grains de feldspaths orthose et plagioclase
 - 40 kg d'oxydes et hydroxydes de fer : ferrihydrite, goethite et hématite
 - 20 kg de calcaire (carbonate de calcium)
 - 10 kg de cristaux de micas
 - 5 kg d'oxydes de titane et de zirconium
 - 1 kg d'oxydes de manganèse
 - 1 kg de phosphates divers
 - Ce qui représente environ 550 kg de silicium, 50 d'aluminium, 25 de fer, 10 de calcium, 10 de potassium, 4 de titane, 2 de sodium, 2 de magnésium, 600 g de manganèse et 200 g de phosphore ; le reste étant 680 kg d'oxygène et 10 d'hydrogène.
 - **20 kg de matière organique**
 - 3 kg de peptides et protéines
 - 2,5 kg de sucres et polysaccharides
 - 5 kg de lignines, composés phénoliques et aromatiques divers
 - 1,5 kg de lipides : cires, alcanes, acides gras, stérols
 - 600 g de pigments, tannins, résines
 - 250 g d'amino-polysaccharides
 - 250 g d'acides organiques
 - 4,8 kg de composés organiques non identifiés
 - 2 kg de charbon de bois, suies et produits de pyrolyse
 - 100 g de plastiques
 - Ce qui représente 10 kg de C ; 8 kg de O ; 800 g de H ; 800 g de N ; 150 g de P ; 100 g de S.
 - **5 kg d'organismes vivants (500 g de matière sèche)**
 - 2 kg (soit 300 m) de racines et rhizomes
 - 1,6 kg de bactéries, soit 100 000 milliards d'individus
 - 1,3 kg de champignons, soit 100 km d'hyphes mycéliens
 - 40 g de vers de terre (vidés) soit 80 individus
 - 25 g d'arthropodes et d'autres invertébrés
 - quelques campagnols

3. Combien de temps faut-il pour former un sol ?

Entre une nuit et plusieurs millions d'années...

En une nuit, ce pourra être le sol d'une dune du Grand Erg, que le vent de tempête aura déplacé de quelques décimètres depuis la veille.

Plusieurs dizaines de millions d'années, ce sera le temps nécessaire pour former, à partir de la roche, la couche d'argile d'un mètre d'épaisseur de certains sols africains ou australiens en climat semi-aride.

Pendant, en moyenne sur la planète, la désagrégation et l'altération des roches par les intempéries et la végétation fabriquent une quantité de sables et d'argiles de l'ordre d'un millimètre par siècle. Pour faire 20 cm de sol, il faut donc compter vingt mille ans. C'est la durée pour obtenir un sol jeune, mais l'évolution du sol est un processus ininterrompu qui se poursuit ensuite sur des centaines de milliers d'années.

La vitesse de formation est modulée par la nature de la roche et le climat : elle sera plus rapide pour un basalte, dont les minéraux sont plus altérables, que pour un granite ; plus rapide en climat humide et chaud, mais aussi facilitée en climat froid par le gel et les acides organiques libérés par la végétation, que les microbes n'auront pas pu biodégrader. Pour la mesure de telles durées, il faut des chronomètres adaptés. Les scientifiques utilisent des atomes rares, comme le beryllium-10 ou l'aluminium-27, formés par les rayons cosmiques qui frappent en permanence la surface de l'écorce terrestre. La quantité accumulée indique depuis quand la matière est exposée à la surface. Les sols les plus anciens, formés sur des dizaines de millions d'années, sont ceux des grands boucliers sud-américains et africains, où aucun mouvement de l'écorce terrestre, ni même le changement du niveau des mers, n'a induit de cycle d'érosion ou de dépôt de sédiments.

Ce qu'il est important de retenir, c'est que les activités humaines, agricoles en particulier, risquent d'accélérer considérablement l'érosion des sols, et que si le sol est érodé, il faudra attendre au moins une dizaine de milliers d'années, mais peut-être bien plus, pour retrouver un sol fertile. Si le sol est fait des alluvions d'un fleuve, il faudra attendre de nombreuses crues. Si c'est un dépôt volcanique, il faudra attendre une autre éruption cataclysmique à même de déposer plusieurs décimètres de ponces ou de cendres. Si la couche de sol érodée est le dépôt de lœss, il faudra attendre la fin de la prochaine glaciation pour en obtenir un nouveau, soit environ cent vingt mille ans, mais sans garantie car l'avenir de notre climat est bien incertain. Un sol érodé est perdu pour des centaines de générations.

Certes, il n'est pas perdu pour tout le monde si la terre érodée par l'eau ou le vent enrichit d'autres sols, ou même en crée de nouveaux, mais cela ne représente qu'une partie de la matière emportée.

4. Sable, graviers et rochers font-ils partie du sol ?

Bien sûr. Mais, dans le détail, c'est une question de définition. Ceux qui étudient le sol définissent par convention la terre fine comme la partie qui passe à travers un tamis de mailles de 2 mm après un broyage modéré. Il suffit de se mettre d'accord sur le broyage. C'est cette terre fine qui sert de référence pour les analyses chimiques. Au-delà, il y a les éléments grossiers, que l'on ne prend pas en compte dans l'analyse chimique, peut-être pas assez d'ailleurs. Ainsi, on parle de graviers pour les particules comprises entre 2 mm et 2 cm, de cailloux entre 2 et 7,5 cm, de pierres entre 7,5 et 25 cm et de blocs au-dessus (d'après la norme NF X 31-003). Au sein de la terre fine, la distribution des tailles des particules gouverne beaucoup de propriétés des sols. On parle de sables entre 0,05 et 2 mm, de limon entre 0,002 et 0,05 mm et d'argiles en dessous de 0,002 mm. Le mot « argile » désigne ainsi soit une nature minérale, soit une taille de particules, les deux se recoupant largement.

On peut apprécier à la main cette granulométrie, car les sables donnent un toucher rugueux, les limons un toucher soyeux, et une terre contenant plus de 35 % d'argiles devient plastique quand elle est mouillée : on peut la modeler. On parle de « texture du sol », et celui-ci reçoit différents qualificatifs en fonction de la proportion précise de chaque composante granulométrique : sableux, argilo-sableux, limono-argileux, etc. Les propriétés les plus évidentes que la granulométrie confère au sol sont les propriétés mécaniques. Les laboureurs les connaissent bien. Les sols sableux, par exemple ceux des landes de Gascogne, sont très faciles à travailler, mais usent les socs de charrue. Les textures argileuses sont difficiles à travailler, car elles collent quand elles sont humides et sont dures comme du béton quand elles sont sèches ; elles requièrent beaucoup d'énergie, qu'il s'agisse de celle du tracteur ou du bras qui tient la bêche ou la houe. Les textures limoneuses des terres dites légères sont, elles, faciles à travailler mais fragiles car elles sont sensibles à l'érosion, à la battance et au tassement.

On néglige souvent le rôle des cailloux. En effet, ces derniers peuvent contenir une quantité d'eau non négligeable, réduire la sensibilité de la terre au tassement ; ils peuvent enfin servir de réserve d'éléments minéraux.

Pourquoi les cailloux reviennent-ils à la surface du sol ?

Eh oui, c'est pénible : plus on enlève de cailloux dans les champs ou les jardins, plus il en revient. À tel point que certains ont même imaginé que la terre formait les cailloux ! Le mécanisme est simple : dès qu'une racine, un ver, un outil ou une fissure forme une petite cavité dans le sol, elle est comblée par les particules fines, et non pas par les grosses. C'est donc plutôt la terre qui tombe au fond, et ainsi les cailloux qui remontent.

5. Comment se fabrique un sol ?

Les gouttes d'eau de pluie se chargent du gaz carbonique et de l'oxygène de l'air qui s'y dissolvent. Lorsque cette eau circule dans les fissures de la roche, la combinaison des deux, acide pour le premier et oxydant pour le second, dissout une infime partie des minéraux les plus altérables. Les cycles de gel et de dégel tendent, eux, à fragmenter les roches. Parfois, les seuls rayons du soleil échauffent suffisamment la surface de pierres encore froides pour les dilater et les fendre. Ainsi les agents météoriques commencent à fabriquer du sol par altération physique et chimique.

Cependant, ces phénomènes seraient extrêmement lents si les organismes vivants n'accéléraient pas ce processus. Les racines, de façon générale, acidifient leur milieu : elles libèrent des protons, en échange des éléments minéraux nutritifs (calcium, magnésium ou potassium) qu'elles prélèvent. De plus, racines, champignons, lichens, bactéries, insectes et autres excrètent toutes sortes d'acides organiques plus ou moins corrosifs, comme l'acide acétique (celui du vinaigre), l'acide malique (celui de la pomme verte), l'acide oxalique (celui de l'oseille), l'acide citrique (rencontré dans le citron par exemple). Ce dernier est capable de dissoudre les métaux comme le fer et l'aluminium, à partir des minéraux des roches comme d'un clou ou d'une casserole. Une partie des éléments solubilisés lors de l'altération des roches ne disparaît pas complètement du sol, mais forme sur place de nouveaux minéraux typiques des sols : argiles, oxydes de fer, oxydes d'aluminium.

L'altération est la plus rapide dans les pays les plus chauds. Cependant, dans les régions froides et suffisamment humides, par exemple au

Canada, en Scandinavie ou en Russie, la dégradation des litières produit des composés organiques acides, que les microbes n'auront pas eu le temps biodégrader complètement faute de températures suffisantes. Ces composés vont extraire le fer et l'aluminium des minéraux et les entraîner en profondeur pour les déposer quelques décimètres plus bas. Dans ces sols, il ne restera en surface que des grains de quartz et de la matière organique. On dénomme ces sols podzols, nom russe venant de leur couleur de cendre.

Le sol et le maréchal-ferrant

Dans un petit village agricole de l'Yonne, il y avait, au début du xx^e siècle, quatre maréchaux-ferrants pour quelques centaines d'habitants seulement ! Cela peut paraître surprenant, sauf quand on sait que les sols, en partie hérités d'argiles à silex, y sont un mélange d'argile très lourde et de cailloux très durs. Des attelages à deux bœufs étaient nécessaires pour les labourer et la terre usait considérablement les outils, dont... les fers des bœufs. Certains maréchaux-ferrants étaient donc spécialisés dans la fabrication de petits fers en deux parties pour chaque sabot, avec parfois une patte qui tient le doigt par-dessus, comme dans une petite tong. Les poser n'était pas une mince affaire !

L'homme, enfin, contribue à l'altération chimique des roches. L'un des effets de son action est connu sous le nom de pluies acides : l'azote et surtout le soufre des charbons et pétroles brûlés se retrouvent dans les fumées et s'oxydent en acide nitrique et sulfurique qui retombent au sol, contribuant à dissoudre les minéraux. Cela a été particulièrement le cas dans les années 1960-1980 dans les massifs forestiers de l'est de l'Europe, sous les vents des industries. L'agriculture peut également contribuer à acidifier les sols en apportant certains engrais acides comme le sulfate d'ammonium ou le nitrate d'ammonium, ou en exportant les éléments calcium et magnésium qui peuvent neutraliser l'acidité naturelle.

En résumé, on peut dire que c'est la biosphère elle-même, dont la matière est d'ailleurs aussi issue de l'atmosphère et de la lithosphère, qui produit le sol, son propre milieu, pour s'y installer de façon durable.

Les roches, mères des sols

La roche fournit la matière minérale des sols et on l'appelle parfois « roche mère ». On en distingue trois grandes classes par leur origine.

- Les roches magmatiques viennent du manteau terrestre et sont arrivées à la surface soit par les volcans, comme les *basaltes*, soit par une remontée progressive du magma, comme les *granites*.

- Les roches sédimentaires, elles, sont formées à partir de matériaux de la surface de l'écorce terrestre, le plus souvent déposés en strates au fond des mers ou des lacs (les sédiments). Elles sont très diverses : les plus abondantes sont les *calcaires*, issus des squelettes de carbonate de calcium de coraux, d'algues ou de coquillages, et des roches qui proviennent de l'érosion des continents. Ces dernières sont plutôt siliceuses, comme les *argiles* ou les *schistes*, les *sables* ou les *grès*. Elles sont plus ou moins consolidées par la pression et les transformations chimiques qu'elles ont subies.

- Une troisième classe, les roches dites métamorphiques, comme les *gneiss*, correspondent à la recristallisation des types précédents lors de leur enfouissement en profondeur, où ils ont subi des pressions et températures élevées ; leurs propriétés sont assez proches de celle des roches magmatiques.

Les roches sont des assemblages de différents minéraux – ce dernier terme désignant une espèce chimique et cristalline pure. Par exemple, le calcaire est fait de calcite, le granite de quartz, de feldspaths et de micas, etc. On peut avoir des variétés de roches qui sont meubles, donc prêtes à former un sol très vite. C'est le cas de certaines roches sédimentaires et de laves : cendres volcaniques, calcaires non consolidés, argiles, sables. Si la nature de la roche conditionne au départ la composition chimique du sol et son acidité, après des dizaines de milliers d'années de transformations, des roches très différentes pourront donner des sols identiques, correspondant à un nouvel équilibre de la surface de la croûte terrestre.

6. Tous les sols se ressemblent-ils ?

Sûrement pas : ceux des Africains sont rouges, ceux des Nord-Américains du Middle West sont noirs, ceux des Méditerranéens plutôt blancs et rouges ; ceux des Bengalais sont bleu-vert et il y a des sols jaunes un peu partout sous les tropiques. En Russie, il y a beaucoup de gris et de châtaîns, en Europe, de bruns. Au-delà de cette diversité visible, due essentiellement à l'abondance et à la forme chimique du fer et des matières organiques, il

y a une diversité invisible bien plus grande encore, qui concerne la chimie du sol, la microbiologie, les propriétés physiques et hydriques.

Les agriculteurs du monde savent apprécier les différences très subtiles entre leurs sols. Et les communautés humaines sont aussi très inégales par la nature de leur sol. Presque toujours, les terres du Nord sont plus riches que celles du Sud, car le climat tropical et la longue pédogenèse n'y ont laissé que des minéraux pauvres en éléments nutritifs, et où l'acidité domine. Ainsi, les sols de Madagascar sont naturellement d'une pauvreté chimique extrême ; ceux d'Haïti, fragiles et dégradés par l'érosion, sont devenus parmi les plus pauvres du monde, alors que les climats de ces grandes îles sont très favorables à la végétation et à l'agriculture.

7. Quel pH a le sol ?

S'il y a une propriété invisible et impalpable du sol importante, c'est bien son degré d'acidité. On parle du pH du sol, ou potentiel hydrogène. Il s'agit en fait du pH de l'eau du sol, et il est imposé par les constituants solides. Au livre des records, certains sols peuvent avoir un pH très acide de 1,5 : plus acide que le vinaigre ou le jus de citron. Ce sera le cas après le drainage et l'aménagement des mangroves ou de marais saumâtres, car l'oxydation des sulfures produit de l'acide sulfurique. À l'opposé, certains sols salins de milieux arides peuvent atteindre un pH alcalin de plus de 9, quand le carbonate de sodium s'y forme, rendant le sol tellement caustique que les plantes ne peuvent y pousser. Le pH des sols les plus communs s'étale entre 3,5 et 8,3, ce qui est déjà une grande variation.

Les manuels de jardinage parlent peu de cette propriété du sol, pourtant essentielle pour les plantes et les animaux. On peut d'ailleurs se procurer facilement des kits de mesure qui utilisent un papier ou des bandelettes colorées. Les sols calcaires ont un pH alcalin, supérieur à 7,5. Vos rhododendrons, vos azalées ou vos camélias y dépériront, vos hortensias seront verdâtres. Beaucoup de plantes y seront carencées en fer, ce qui se traduira par des feuilles jaunes, chlorosées. À l'inverse, dans un sol acide, à pH < 4, il n'y aura pas de lombrics, beaucoup de plantes seront intoxiquées par l'aluminium, qui devient alors soluble. Il y a peu de calcium dans les sols acides, et les plantes calcicoles comme les cistes, les cornouillers ou les aubépines y seront malheureuses.

Les sols ont une tendance naturelle à devenir acides, sauf sur roches calcaires ou en milieu aride. C'est pourquoi l'agriculture remonte le pH des sols trop acides en y apportant des amendements alcalins riches en

calcium, en général du calcaire, de la dolomie ou de la chaux. On parle du chaulage. Mais l'acidité reste un problème énorme pour les pays et continents qui ne disposent pas de telles roches : typiquement, de très grandes régions intertropicales d'Afrique, d'Amérique ou d'Asie du Sud-Est.

Contrairement aux idées reçues, la plupart des activités microbiennes sont aussi importantes à pH 4 qu'à 7 ou 8, bien que les communautés présentes soient différentes.

8. Les sols ont-ils des noms ?

On pourrait croire que le kandiudalf est un personnage de Tolkien, et l'acroperox un dinosaure. Le technik solonchak, une danse... Ce sont des noms de sols.

Les sols ont de tout temps eu des noms vernaculaires, tels les boulbènes ou terreforts dans le Sud-Ouest, le dior ou dek au Sénégal. Mais les scientifiques, sur les traces du Russe Dokoutchaev, ont ressenti au début du xx^e siècle le besoin de classer et dénommer les sols, à l'instar des naturalistes grâce à qui le criquet pèlerin n'a pas dix noms différents ou, inversement, tous les gros poissons du monde ne s'appellent pas « capitaine ». Les classifications sont indispensables à tous ceux que le sol concerne, agriculteurs, forestiers, aménageurs, car ces références communes permettent de comparer les milieux et de prévoir certaines propriétés.

Deux grandes classifications sont largement utilisées dans le monde. La classification mondiale World Reference Base de la FAO (Food and Agriculture Organization des Nations Unies) a repris des noms vernaculaires de grands sols du monde, tels le chernozem, « terre noire » russe, l'andosol, du japonais *an* (sombre) et *do* (terre), la rendzina, sol polonais qui « sonne » ou « parle » sous la charrue en raison de ses nombreuses pierres, ou le solonchak, sol russe salé. Le spécialiste comprend instantanément, si l'on lui dit qu'un sol est un « podzol », qu'il est acide, pauvre en éléments nutritifs, sableux en surface, drainant dans la partie supérieure et qu'on le trouvera en climat froid ou pluvieux. La classification américaine (US Soil Taxonomy), elle, utilise trois syllabes significatives. Nos « kandi-ud-alf » et « acro-per-ox » sont des termes de cette classification. Au niveau de détail le plus fin, cette Soil Taxonomy définit aussi plus de 10 000 noms de types locaux (*series*).

Ces classifications recourent essentiellement au repérage d'horizons particuliers, dits « horizons diagnostics », et à la succession des horizons dans le profil. Les critères précis font appel à des seuils de caractéristiques mesurables sur place, comme la couleur, la texture ou le pH, et parfois de

caractéristiques mesurées en laboratoire, comme certaines concentrations en éléments chimiques. Les différences entre les deux grandes classifications trahissent deux écoles de pensée scientifique contrastées : la Soil Taxonomy, anglo-saxonne, pragmatique, décrit les seules caractéristiques objectives des sols, permettant d'en prévoir le comportement pour le gérer, sans chercher à connaître son origine. La WRB, plus empreinte de cultures russes et latines, est plus cartésienne voire causaliste : elle cherche à rendre compte de l'origine de ses propriétés, à les expliquer : elle regarde plus le passé et la genèse du sol. On retrouve ici deux manières opposées mais complémentaires d'aborder les sciences naturelles, ou les sciences en général.

9. Comment le sol peut-il devenir pierre ?

Il existe de très nombreuses situations où les sols se transforment progressivement en pierre : ces zones couvrent actuellement 1/3 des espaces inter-tropicaux et quelques espaces dans les milieux tempérés. Le vocable « pierre » doit être entendu dans son acception la plus populaire : une pierre n'est qu'un fragment de roche, un caillou plus ou moins volumineux – ce qui ne dit rien sur son origine.

Les sols furent primitivement des cailloux. Ces cailloux minéraux se sont dégradés physiquement puis chimiquement, en particulier par les circulations d'eau plus ou moins acides et chargées de gaz. Chaque fois que des conditions climatiques ont été favorables, des végétaux se sont installés et ont contribué à former des sols contenant des matières organiques, résidus de tous les organismes vivants. Puis, dans des situations climatiques à la fois très humides et très chaudes, souvent synonymes de moussons, les argiles de ces sols, ces matériaux silicatés à feuillets recelant de la silice et des cations (Fe, Al, Ca, Mg, K, Na, Mn, Ni et quelques autres), se sont hydrolysées plus ou moins totalement. En clair, l'horizon de surface se désagrège, perd ses cations les plus mobiles tels K, Na, Ca et Mg, mais les oxydes de fer ferrique couleur rouille et d'aluminium (oxyhydroxydes pour les chimistes savants), moins solubles que les autres éléments et formant des gels, précipitent localement et peuvent redevenir des pierres. Ces oxydes illuminent alors ces paysages rouges, si connus sous les tropiques : il y a eu formation de latérite, du latin later, « brique ». On parle désormais de sols à sesquioxides. Les pédologues ont montré que, pour que la latéritisation du sol primitif ait lieu, la nappe phréatique doit remonter suffisamment pendant une partie de l'année pour atteindre les zones les plus lessivées.

Ces lents phénomènes de latérisation se sont déroulés de manière active entre – 35 millions et – 1,5 million d'années. Ils ne peuvent se dérouler que dans des zones quasiment plates où l'érosion est presque absente. Les pédologues parlent alors de profils d'altération avec formation de cuirasses superficielles qui contiennent jusqu'à 75 % d'oxydes de fer et d'aluminium.

Sous la cuirasse, on trouve des carapaces. « Cuirasse » et « carapace » sont deux termes qui évoquent combien les sols couverts de latérites sont peu favorables au développement de pratiques agricoles. Tous les sols, quelles que soient les roches mères qui en sont à l'origine (des roches sédimentaires tels les sables, les argiles ou les craies, des roches ignées comme les granites, basaltes ou gabbros, ou bien des roches métamorphiques comme les schistes et les gneiss), peuvent devenir des sols à sesquioxydes pierreux dès que les situations sont celles de régions à mousson.

Sous d'autres climats et beaucoup plus rapidement (en milliers d'années et non plus en millions), les sols peuvent devenir aussi durs que la pierre. Cela se passe quand des éléments chimiques viennent former des ciments autour des grains de sable ou des cailloux. Dans les podzols sableux, ou dans les sols lessivés et dégradés riches en galets ou cailloux, ces ciments peuvent être des hydroxydes de fer, d'aluminium et de manganèse, dissous à partir des minéraux des sols et reprécipités dans des conditions particulières nécessitant une remontée significative des nappes phréatiques en hiver. On parle en général d'« alios » (un mot d'origine gasconne), mais les noms locaux sont variés : « grepp », « garluche » dans le piémont pyrénéen, par exemple. Ils étaient même utilisés comme pierres de construction. Ailleurs, sous des climats plus secs, les ciments peuvent être du calcaire (carbonate de calcium) précipité dans le sol lui-même lorsque l'eau s'évapore, des argiles compactes ou de la silice.

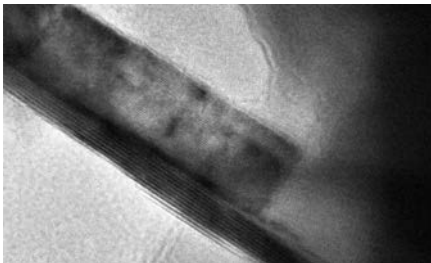
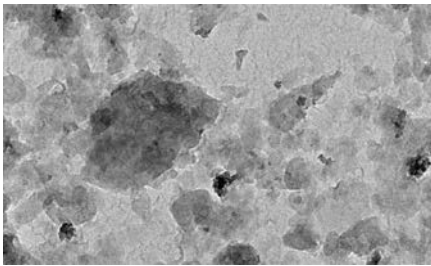
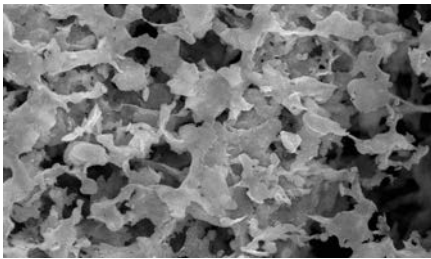
Altération des minéraux primaires, lessivage, reprécipitations diverses, sont les moteurs de la transformation des sols en pierre. Ils constituent des dégradations majeures des sols qui les rendent physiquement infertiles, par induration limitant le passage des racines ou de l'eau. Tous ces mécanismes objectivement négatifs ne doivent pas nous faire oublier que, dans l'Est asiatique, nombre de temples, tel Angkor, sont construits en latérite, parfois recouvert de grès, pierre également constituée de sables agglomérés par de la silice, voire de l'oxyde de fer.

À des échelles de temps plus longues, quand les anciens sols seront enfouis, la diagenèse, par l'action de la température et de la pression élevées, transformera lentement et inexorablement la matière des sols en pierres,

mais c'est une autre histoire, qui se passe dans les profondeurs du sous-sol. Les chanceux pourront y retrouver des œufs de dinosaures, ou, plus tard, peut-être nos propres traces...

10. Qu'est-ce que les argiles ont de si particulier ?

Les argiles sont les constituants les plus emblématiques des sols et sont indissociables de leur fertilité. Elles sont issues de l'altération des minéraux des roches et sont composées principalement de silicium et d'aluminium, combinés à de l'oxygène et de l'hydrogène. La particularité unique de ces minéraux est d'être organisés en feuillets d'atomes et de former des particules de très petite taille : souvent inférieure au micromètre. On peut les imaginer dans le sol comme des confettis microscopiques.



Trois vues en microscopie électronique des argiles d'un sol. En 3D, les particules se présentent comme un réseau de feuilles collées les unes aux autres (en haut, $\times 5\ 000$). Par transparence, on voit les particules individuelles, toutes de moins d'un micromètre (au milieu, $\times 50\ 000$). En coupe, on peut voir par diffraction les feuillets d'atomes de deux cristaux (en bas, $\times 500\ 000$).

Lorsque les argiles sont chauffées à plus de 900 °C, leur structure chimique change. Elles perdent de l'oxygène et de l'hydrogène (de l'eau) et deviennent céramiques : c'est la terre cuite, un matériau particulièrement stable, dur et inaltérable. Il y a plusieurs espèces d'argiles dans les sols, avec des propriétés assez variées. En général blanchâtres, parfois vertes, comme la glauconie qui porte le nom de sa couleur, dans les sols, elles sont rarement blanches car elles s'associent à des oxydes et hydroxydes de fer qui les colorent en jaune, orange ou rouge. Les argiles les plus réactives sont de la famille des smectites, très fréquentes dans les sols. Le représentant le plus typique est la montmorillonite, du nom de Montmorillon dans la Vienne, aussi connue sous le nom de terre de Sommières. Ses cristaux ne sont constitués que de quelques dizaines de couches d'atomes d'épaisseur, soit quelques millièmes de millimètre. Ils développent des surfaces extrêmement importantes : 100 m²/g, ce qui représente déjà la surface d'un bel appartement. De plus, en raison de leur structure cristalline, ces particules sont couvertes de charges électrostatiques, surtout négatives. Petite taille, grande surface développée et charges permettent aux argiles de retenir d'importantes quantités d'eau, d'être plastiques, et d'adsorber toute sorte de composés, au premier rang desquels les éléments nutritifs Ca²⁺, K⁺, Mg⁺, NH₄⁺ ou les matières organiques. Pour toutes ces raisons, les argiles sont un élément central de la fertilité des sols.

Les smectites gonflent quand elles se mouillent et font des fentes de retrait quand elles sèchent. Certains sols très riches en smectites sont ainsi animés en permanence de lents mouvements au rythme des intempéries, qui produisent des microreliefs à la surface, empêchent certains arbres d'y pousser, déstabilisent les constructions et les routes ou font pencher les poteaux électriques. Ils sont appelés vertisols, littéralement « les sols qui tournent ».

Une autre espèce d'argile, la plus fréquente sur la planète, est la kaolinite, du nom de Gaoling, site de carrières dans le Jiangxi, en Chine. Elle gonfle très peu et est excellente pour la céramique. Cuite à 1 200 °C, elle donne la porcelaine (voir question 78). Ses particules sont plus grosses et rigides que celles des smectites : à l'échelle de la taille « confetti » de ces dernières, on pourrait se les représenter comme des cartes à jouer. Très stable chimiquement, même pendant des centaines de milliers d'années, la kaolinite est l'argile principale des sols tropicaux. Contrairement à la montmorillonite, elle a très peu de charges et contribue peu à la fertilité chimique, une des raisons pour lesquelles les sols tropicaux sont plus pauvres que les sols jeunes ou tempérés.

11. Le sol est-il plus riche en minéraux ou en matière organique ?

Si les matières végétales ne se décomposaient pas et s'accumulaient depuis la dernière glaciation, nous marcherions sur un matelas de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur de débris végétaux (mais la réserve de CO₂ atmosphérique disponible pour les végétaux aurait été épuisée bien avant). En fait, à l'exception des tourbières, où la décomposition des matières végétales est incomplète et où ces dernières s'accumulent effectivement sans fin, la quantité de matière organique résulte d'un régime établi entre la production de matière organique par la végétation et la vitesse à laquelle les décomposeurs la transforment en gaz carbonique CO₂, par respiration. Il y a donc bien plus de minéraux dans les sols.

Un cube de sol de 1 m × 1 m × 1 m contient 1 200 à 1 600 kg de minéraux, exceptionnellement moins – jusqu'à 300 kg dans des sols volcaniques très particuliers, les andosols. La quantité de matière organique est, elle, en moyenne sur la planète, hors roches et glaces, de l'ordre de 30 kg dans ce cube de 1 m de côté.

Cette teneur en matière organique varie en fonction des conditions qui régulent la production végétale et l'activité microbienne : la température, l'usage des terres, la pluviométrie, la teneur en argiles du sol. Comme la production végétale et donc le retour de carbone au sol dépendent d'abord de la pluviométrie, et que la biodégradation est d'autant plus rapide que la température est élevée, il y a des gradients de concentration en matière organique dans le monde : d'éllevée dans les zones humides et froides à faible dans les déserts chauds, et moyenne dans les zones humides tropicales comme dans les steppes et déserts froids ou dans les milieux tempérés. La nature des minéraux compte aussi : toutes choses égales par ailleurs, un sol très argileux contiendra 2,5 fois plus de carbone organique qu'un sol sableux, car les argiles adsorbent les composés organiques, les protégeant de la biodégradation. Enfin, de nombreuses pratiques agricoles tendent à diminuer la teneur en matière organique en accélérant leur biodégradation (voir question 52).

Qu'est-ce que la matière organique ?

On définit la matière organique comme l'ensemble des composés contenant principalement du carbone associé à des atomes d'hydrogène. On exprime les quantités en carbone organique, que l'on oppose au carbone inorganique, celui des carbonates ($MgCO_3$, $CaCO_3$) et hydrogénocarbonates (HCO_3^-). La teneur en carbone de la matière organique des sols varie localement de 45 à 55 %. Dans le sol, elle provient quasi exclusivement de la matière vivante : des composés végétaux et des composés microbiens pour environ 50 % chacun. Il s'agit des composés qui n'ont pas encore été biodégradés ou qui sont protégés de la biodégradation. Leur âge moyen dans les 20 premiers centimètres de sols est compris entre 20 et 200 ans.

La matière organique est un constituant particulièrement intéressant pour deux raisons : d'une part, elle a des propriétés globalement positives, d'autre part, c'est un des rares constituants du sol que l'homme peut gérer et dont il peut contrôler la quantité, directement. Une quantité élevée de matière organique est bénéfique pour l'agriculture et l'environnement. C'est en effet une composante importante de la fertilité physique des sols. Elle contribue à stabiliser la structure physique et à prévenir le tassement et l'érosion, en augmentant la porosité et donc l'aération et la rétention d'eau. Elle participe également à la fertilité chimique des sols car elle est la principale réserve des éléments N, P, S et elle retient les éléments nutritifs K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} grâce à ses charges de surface négatives. Enfin, elle alimente tous les organismes décomposeurs, autrement dit la quasi-totalité du monde vivant du sol.

12. Comment le sol retient-il les éléments nutritifs ?

Les plantes et de nombreux microbes assimilent les éléments minéraux essentiellement sous forme de sels solubles. S'il vous est déjà arrivé de lire la composition d'eaux minérales, vous pouvez y trouver la liste de ces sels solubles : calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), potassium (K^+), manganèse (Mn^{2+}), sulfate (SO_4^{2-}), chlorure (Cl^-), nitrate (NO_3^-), fluorure (F^-), iode (I^-), etc., et aussi ammonium (NH_4^+), phosphates. Le bicarbonate (HCO_3^-), lui, n'intéressera que les algues.

Le sol retient et libère ces éléments par trois mécanismes :

– les constituants du sol sont électriquement chargés, le plus souvent négativement. Cette propriété vient de certaines argiles et des matières organiques. Comme le + attire le –, les ions positifs sont retenus sur les

surfaces et ne sont pas entraînés par l'eau. Les ions négatifs, eux, sont moins retenus et ont plus tendance à s'écouler (cas du nitrate NO_3^-). Plus le sol a de charges négatives, plus il peut retenir d'ions : une charge + d'ion par charge - du sol. Un sol peut ainsi retenir cent fois plus d'ions fixés que d'ions en solution. L'équilibration électrique des ions positifs et négatifs en solution contrôle ensuite la composition de l'eau qui percole. C'est le même principe qui fait que le sol peut épurer l'eau et que l'eau de source est (en général) si pure ;

- en ce qui concerne les éléments N, S et une partie de P, ils sont aussi stockés sous forme d'atomes constituant les matières organiques. Il s'agit d'une très grosse réserve d'éléments. C'est la biodégradation par les bactéries, les champignons et l'excrétion des animaux qui libère petit à petit ces éléments sous forme soluble, assimilables ;

- enfin, les minéraux constituant le sol représentent une grosse réserve d'éléments (tous sauf N), mais sont extrêmement peu solubles. La dissolution des minéraux — l'altération — ne fournit donc qu'une petite quantité d'éléments nutritifs, et à un rythme très lent. Avec les pluies, c'est cependant la source principale de nutriments dans les écosystèmes non fertilisés.

13. Que fait l'eau dans un sol ?

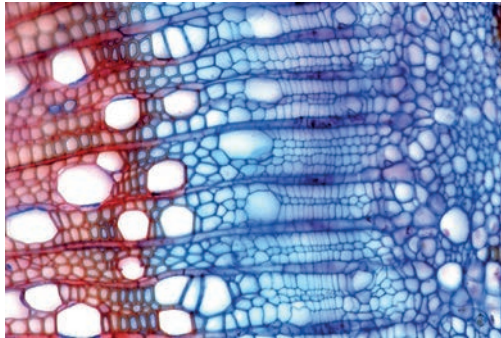
Lorsqu'un agriculteur affirme : « Aujourd'hui, mes sols sont vraiment trempés. », l'adjectif « trempé » possède une signification tout autre que celle contenue dans l'expression « acier trempé », c'est-à-dire un acier qui a reçu une bonne trempe pour le durcir. Même très dur, comme dans le cas d'une cuirasse latéritique, un sol n'a jamais les propriétés d'une pierre ou d'un acier. La seule signification possible est que le sol est imbibé, très mouillé.

La partie émergée de la planète reçoit chaque année quelque $110 \times 10^3 \text{ km}^3$ d'eau, soit en moyenne une hauteur de pluie de 780 mm (780 litres/m²). Les pluies qui arrosent les champs se logent dans les pores des sols, tout en chassant l'air, donc l'oxygène, le volume des pores étant une variable assez stable pour un sol donné quand il est « ressuyé ». L'eau réussit, au quotidien, à modifier les propriétés physiques, chimiques et biologiques de n'importe quel sol. Mais le sol influence aussi le comportement de l'eau. Et les plantes exercent également des actions : en fait, il faut considérer le sol, l'eau et les plantes comme un continuum en raison des constantes interactions entre eux.

Les physico-chimistes nous ont appris que la molécule d'eau était orientée, donc polaire (l'atome d'oxygène étant le pôle négatif), et qu'elle est, en

permanence, susceptible de tisser des liaisons hydrogène avec nombre de constituants des sols. Chacun sait aussi, en admirant sa peau au sortir d'une douche, que l'eau développe des mécanismes de tension superficielle ; ainsi notre peau est-elle couverte, après la douche, non d'une couche homogène d'eau, mais de belles gouttes hémisphériques. L'eau est même un des liquides familiers dont la tension superficielle est la plus élevée. Cette propriété générale est fondamentale dans les mécanismes de capillarité qui permettent à l'eau, dans un sol, de se diriger vers le haut, c'est-à-dire contre la pesanteur ! Les plantes peuvent ainsi continuer d'évaporer de l'eau même quand leurs racines ne trempent pas dans la nappe phréatique libre, car l'eau a pu remonter jusqu'aux racines.

Dans l'extraction de l'eau du sol et l'évapotranspiration des plantes, d'autres propriétés sont à l'œuvre : l'osmose entre les cellules des racines et les constituants des terres, qui retiennent l'eau et l'extension du système racinaire.



Coupe de bois de peuplier. Les vaisseaux du xylème transportent l'eau depuis les racines jusqu'au sommet des arbres.

Comment le sol retient-il l'eau ?

C'est essentiellement la capillarité qui retient l'eau dans le sol et l'empêche de s'écouler. Dans les sols il y a toutes les tailles de pores, depuis les infiniment petits situés entre les argiles, jusqu'aux gros trous de vers et fissures que l'on voit à l'œil nu. L'eau se place de préférence dans les pores les plus petits, puis, au fur et à mesure, remplit les plus gros. Inversement, quand le sol sèche, l'eau quitte d'abord les gros pores et reste dans les plus petits.

On distingue, du plus humide vers le plus sec, trois seuils d'humidité caractéristiques du sol.

.../...

.../...

- Si tous les pores sont remplis d'eau, on dit que le sol est saturé. L'eau circule librement dans le milieu mais ces conditions ne sont pas idéales pour la végétation puisque les racines peuvent manquer d'oxygène. Le volume d'eau d'un sol saturé représente 40 à 50 % du volume du sol.

- Dans les pores de diamètre inférieur à $1/30^{\text{e}}$ mm de diamètre, les forces capillaires qui lient l'eau aux côtés des pores sont plus fortes que celles qui la font descendre par gravité. La quantité de ces pores détermine la quantité d'eau que le sol peut retenir, une fois que l'on a laissé l'eau s'écouler par gravité. Il s'agit de la capacité de rétention en eau.

- Enfin, quand l'eau est retenue dans des pores inférieurs à $0,2 \mu\text{m}$, il faudrait une succion de 15 bars pour l'extraire. C'est la succion limite que peuvent exercer les racines des plantes. On parle du point de flétrissement permanent.

La quantité d'eau que l'on trouve entre ces deux limites est dénommée réserve utile pour les plantes : c'est la quantité d'eau qu'un sol peut garder en réserve pour alimenter les plantes entre deux pluies. Ces quantités caractéristiques sont très variables en fonction du type de sol. Dans des sols limoneux, la réserve utile représente environ 15 % du volume du sol.

14. La Terre manque-t-elle d'eau ?

Quelle quantité d'eau y a-t-il sur Terre ? Le total des différents compartiments s'élèverait à environ $1\,320 \times 10^6 \text{ km}^3$. Les océans, qui couvrent environ 70 % de la surface de la planète, en contiendraient plus de 97 %, les glaces environ 2 % et l'eau souterraine 0,7 %. Le reste (soit moins de 0,1 %) se distribue entre les surfaces en eau (0,01 %), l'eau qui humidifie les sols sur le premier mètre (0,005 %), l'humidité de l'air, les fleuves et enfin la biosphère qui n'en recèle que 0,00004 %, soit environ 600 km^3 . Si la Terre était bien ronde alors que son rayon moyen volumétrique est de 6 371 km, les $1\,320 \times 10^6 \text{ km}^3$ formeraient une couche d'eau d'environ 2,6 km de hauteur, un peu inférieure à ce qui a eu lieu au moment du Déluge puisque tout était recouvert d'au moins quinze coudées. C'est pourquoi il semble difficile, en première analyse, de conclure que la Terre manque d'eau !

Cependant, la majorité de l'eau présente est salée. De plus, la répartition spatio-temporelle de l'eau, à l'échelle annuelle, est loin d'être homogène sur la partie émergée de la planète. Par le passé, le destin de certaines

populations humaines fut scellé par des contraintes hydriques majeures. Tels sont les cas, parmi les plus célèbres, des civilisations mayas et de la civilisation mycénienne.

L'eau qui nous est utile est assez quantitativement limitée, d'autant plus qu'elle est prise dans le cycle hydrologique planétaire qui en modifie l'état (vapeur, liquide et solide) et la répartition. Les molécules d'eau (H_2O) étant chimiquement très stables, elles ne sont pas détruites sur notre planète. Par contre, elles se déplacent beaucoup, et l'homme y contribue parfois significativement car il s'attaque, par ses prélèvements, à des compartiments hydriques très petits pour satisfaire ses envies et besoins, sans cesse grandissants.

On peut estimer que, durant le cycle annuel, $430 \times 103 \text{ km}^3$ d'eau sont évaporés à la surface des océans et que $390 \times 103 \text{ km}^3$ y retournent sous forme de pluie, ce qui laisse $40 \times 103 \text{ km}^3$ disponibles pour arroser la fraction émergée de la planète. Cette fraction émergée en reçoit en fait $110 \times 103 \text{ km}^3$ car $70 \times 103 \text{ km}^3$ s'évaporent depuis la surface des sols. Les $40 \times 103 \text{ km}^3$ qui ne sont pas revenus directement dans les océans avec la pluie y reviennent par des écoulements de surface pour environ $38,5 \times 103 \text{ km}^3$ et, pour $1,5 \times 103 \text{ km}^3$ par infiltration, parfois chargée d'une partie des intrants agricoles, dans les nappes phréatiques profondes qui contiennent environ $9\,500 \times 103 \text{ km}^3$.

L'homme agricole mise sur la pluie et, depuis un peu moins d'un siècle, sur le pompage dans des nappes souvent peu profondes pour assurer des productions agricoles nourricières. L'homme industriel mise très souvent, pour conduire ses activités manufacturières, sur l'eau des nappes profondes dont les vitesses de renouvellement sont faibles si l'on compare les quantités infiltrées à celles qui y sont présentes. C'est donc sur ce poste que se jouent les contraintes hydriques pour les humains, d'autant plus que, même si les molécules d'eau ne sont pas détruites, elles peuvent revenir vers les différents compartiments hydriques chargées de molécules à risque nés du génie chimique. Lorsque la Terre manque d'eau, ce sont bien les sols qui en manquent, parfois cruellement parce que c'est l'eau qui limite le plus souvent la production alimentaire : sécheresse devient synonyme de famine et de malnutrition.

L'agriculture est une grosse consommatrice d'eau, car les végétaux doivent évaporer une quantité d'eau équivalente à plus de 250 fois le poids de matière sèche qu'ils produisent, un chiffre lié à leur physiologie, et que l'on ne sait pas réduire techniquement. Les usagers sont donc souvent en compétition pour l'eau, et parfois aussi les peuples. Cela s'exprime clairement

le long des fleuves dont l'eau est utilisée pour l'agriculture et l'irrigation : moins de 10 % du débit du Colorado arrivent à son embouchure dans le golfe de Californie, au Mexique, et le débit même s'est réduit de 30 % entre 2002 et 2010. L'Indus ne débouche plus dans l'océan Indien. Le Jourdain devient salé dans sa partie aval. L'eau ne parvient plus à la mer d'Aral, transformée en désert. Le réchauffement climatique tend à accentuer la rareté de l'eau, en augmentant l'évaporation, et en diminuant les réserves d'eau des glaciers de l'Himalaya, des Rocheuses ou des Andes, qui habituellement retardent l'écoulement des précipitations des saisons humides et le décalent vers les saisons sèches. À l'échelle globale, les solutions triviales au manque d'eau consisteraient à déplacer la production agricole vers l'eau ou l'inverse. La Chine a par exemple engagé la construction d'un ensemble d'aqueducs et de canaux pour transférer une part du Yangzi Jiang vers la plaine du fleuve Jaune, sur une distance équivalente à l'irrigation du sud de l'Espagne depuis la Suisse. Pour les solutions plus locales à cet énorme problème de la rareté et de la compétition pour l'eau, on pourra se référer à l'ouvrage de la FAO (2011) en bibliographie.

L'origine de l'eau sur Terre

D'où vient l'eau de notre planète ? On sait qu'elle est omniprésente dans des nuages interstellaires de la voie lactée, les deux éléments la constituant, O et H, étant parmi les plus fréquents de l'univers. Les hypothèses scientifiques sur l'origine de l'eau sur Terre varient, aucune ne permettant actuellement de rendre compte simultanément de toutes les observations. Pour certains, l'eau est arrivée de l'extérieur soit sous forme chondres (petits grains silicatés piégés dans une matrice pouvant contenir jusqu'à 3 % de C et de l'eau), soit sous forme de comètes chargées d'eau (car les comètes contiennent jusqu'à 80 % d'eau sous forme de glace) qui se seraient écrasées sur la Terre durant sa formation. Cependant, l'analyse isotopique de l'eau de la comète 67P effectuée fin 2014 par la sonde Rosetta montre des différences fortes avec l'eau terrestre... Pour d'autres, l'eau actuellement présente sur Terre proviendrait du dégazage du magma terrestre, libérant de la vapeur d'eau, ce qui implique un déluge considérable, mais... n'exclut pas la première hypothèse.

15. Y a-t-il des terres salées ?

L'eau des océans, vraiment salée, recèle la majorité visible et mesurable des sels de la Terre. On entend par « sels » des composés minéraux très

solubles et neutres en termes d'acidité. Les principaux sont les chlorures et les sulfates de sodium, calcium et magnésium. Les eaux continentales (lacs, nappes et rivières) sont très généralement douces, c'est-à-dire très peu salées. Mais y a-t-il des terres salées, comment nos terres se salent-elles, qu'est-ce qu'une terre salée et surtout qu'est-ce qu'une terre trop salée ?

Dès leur formation, toutes les terres contiennent des sels. Ils proviennent de la dissolution des roches et des minéraux, et leur teneur dépend en premier lieu de la teneur en sels des roches. Certes, la présence de sels est strictement indispensable au développement des organismes vivants de toute nature ; la terre doit donc être un peu salée. Mais, en excès, les sels provoquent un affaissement de la structure physique des sols, ce qui réduit leur porosité, les transferts de gaz et d'eau et leur activité biologique. Cela dégrade également leur fertilité chimique en augmentant la pression osmotique de l'eau, ce qui réduit la disponibilité de l'eau pour les plantes. Néanmoins, dans le monde végétal, s'il existe des plantes très sensibles au sel, telles la pomme de terre ou la tomate, d'autres sont très tolérantes, comme le coton ou la betterave à sucre. Mais même ces dernières vivent mieux sans sel.

L'accumulation de sels dans les sols a deux origines : l'une, naturelle, l'autre, anthropique. Les écosystèmes terrestres transpirent *via* deux mécanismes : l'évaporation de la terre elle-même et la transpiration des plantes puisque, pour tout accroissement de matière végétale sèche de 1 kg, les plantes ont dû consommer de 300 à 500 litres d'eau prélevée dans la terre. Si l'évapotranspiration de l'eau est inférieure à la pluviométrie, l'excès d'eau drainé à travers les sols permet de lessiver ces sels solubles vers les nappes, les rivières et, en définitive, les océans. Dans le cas contraire, comme dans les zones arides et semi-arides de la planète, des sels s'accumulent à la surface des terres. Ce mécanisme naturel contribue à limiter la fertilité des sols des régions sèches et à former des gisements de sel.

Sous des climats plus humides, les nappes qui baignent ces gisements, comme dans la vallée de la Seille, forment des sources et des sols salés, où pousse la salicorne, délicieux légume mangé en salade ou en aromate. Exploitée depuis l'âge du bronze par la technique du briquetage, l'eau salée est évaporée dans des fours, tandis que le sel s'accumule dans des pots de terre cuite, que l'on casse pour en tirer des pains de sel, dont le commerce a fait la richesse historique de la Lorraine.

L'autre origine, anthropique, est la conséquence de l'irrigation imaginée depuis des siècles par les agriculteurs pour accroître les récoltes. Lorsque l'eau manque peu, on peut irriguer beaucoup. Mais lorsqu'elle manque beaucoup, on tend à être parcimonieux car la ressource est rare... et c'est l'erreur ! Si l'eau est apportée en quantité un peu supérieure à la demande évapotranspiratoire de la culture et si le sol est filtrant, les sels apportés avec l'eau d'irrigation seront lessivés en dessous du niveau des racines. Mais si toute l'eau apportée est transpirée, les sels s'accumuleront dans l'horizon de surface et la fertilité du sol sera dégradée. L'élément le plus redoutable est le sodium, qui désagrège les sols et disperse les argiles, ce qui colmate et asphyxie les sols. C'est la maladie banale et honteuse de nombreux périmètres d'irrigation mal conduits. Ne salez donc pas plus vos sols que vous ne salez votre nourriture ! Cela évitera la stérilisation de vos terres.

Un remède qui peut être pire que le mal

La salure des sols est un fléau pour l'agriculture des régions arides et des régions envahies périodiquement par de l'eau marine. Et le problème risque de s'amplifier avec le changement climatique. On nous vante depuis quelques années une solution miracle : des cultures résistantes au sel, sélectionnées naturellement ou génétiquement modifiées.

Des riz sont déjà au point, dans lesquels on a introduit un gène bactérien de biosynthèse d'un sucre, le théhalose, qui protège des stress osmotiques ou salins. Malheureusement, il est très probable que l'utilisation en sols salés de telles cultures tolérantes, en augmentant l'évapotranspiration, salera encore plus ces sols, progressivement, risquant de les dégrader ou de les rendre impropres aux autres cultures. Il faut donc se méfier d'apparentes bonnes idées, et au moins les accompagner des recettes de gestion (drainage des sols et maîtrise de l'irrigation) qui permettront de ne pas dégrader ces milieux.

Cartago delenda est

À l'issue de la troisième guerre punique, Rome, pour se venger, entreprit de détruire totalement la puissante cité-État phénicienne de Carthage, au nord de l'actuelle Tunisie. La légende rapporte que les Romains, afin d'empêcher toute survivance de la cité, auraient recouvert de sel ses champs pour les stériliser. Vraie ou fausse, elle donne une idée de l'animosité des Romains et de leurs connaissances agronomiques !

16. Quels trésors recèlent les puits ?

Un puits est une cavité physique qui relie la surface de notre terre à un horizon inférieur. Les puits représentent donc un excellent moyen de comprendre comment s'est formée et a évolué la Terre. Le moins profond des puits est certainement le puits perdu. En fait, ce n'est pas le puits qui est perdu, mais des liquides que l'on cherche à « perdre » pour les faire disparaître de notre vue ou de notre odorat ! Rappelons que la tendance naturelle des liquides est de descendre et que Lavoisier, avant d'être guillotiné, a montré que « rien ne se perd » ; il est alors normal de retrouver dans les nappes phréatiques des polluants que l'on aurait expédiés au puits perdu.

Le plus « intuitif » des puits est évidemment le puits historique, voire pré-historique, utilisé pour pouvoir remonter de l'eau à la surface. Les fouilles archéologiques datent de l'âge du cuivre les premiers puits, qui n'étaient que des cavités creusées dans la terre sans protection contre les éboulements. Les civilisations plus anciennes avaient pris la précaution, pour se procurer de l'eau, de s'installer en bordure de rivières. La profondeur de ces puits ne dépasse pas 50 m et l'eau est remontée grâce à l'énergie humaine ou animale. Il ne faut pas oublier les puits artésiens, où l'eau remonte seule à la surface car le niveau des sources est au-dessous du niveau le plus haut de la nappe phréatique, et l'eau est piégée sous pression dans cette dernière.

Les puits naturels, nommés gouffres, glacières, avens, scialets, etc., sont des espaces creusés, au cours des siècles, par les eaux dissolvant des carbonates dans des milieux karstiques. Ils sont le paradis des spéléologues. Le plus profond se trouve en Chine. Il s'agit du Xiaozhai Tiankong qui descend à - 662 m. En France, le puits naturel le plus profond est celui des Pirates, dans les Pyrénées (- 328 m).

L'homme, à la recherche de toute sorte de minerais pour en faire des parures, de la monnaie ou des objets industriels, s'est mis à creuser un peu partout. Le record, en tant que puits de mine exploité, est détenu par la mine d'or de Tau Tona ouverte en 1962, qui s'enfonce désormais à 3 900 m sous terre et est située en Afrique du Sud. Les mineurs en sortent 15 t d'or par an à partir d'un dédale de galeries long de 800 km. Le record français revient aux mines de charbon en Lorraine, au puits Vouters à Freyming Merlebach, qui descendait à - 1 300 m et dont la tour a été dynamitée en juin 2007 après cinquante ans de loyaux services, scellant le déclin industriel de la Lorraine.

Les puits de pétrole (*petra oleum*, ou huile de pierre) ou de gaz reposent sur des techniques différentes puisque l'homme « se limite », en forant, à enfoncer un tube vers le centre de la terre. Il ne va pas lui-même au fond ! Le plus profond de ces puits est probablement situé dans le nord-est de la Chine, à Daqing, et atteindrait 5 520 m. Le gaz de Lacq, extrait dans la province du bon roi Henri, remontait de 4 000 m.

Que trouve-t-on, *in fine*, dans les différents puits terrestres ? Des déchets s'écoulent des puits perdus (mais pas perdus pour tout le monde), de l'eau est prélevée dans un puits ordinaire ou artésien, du pétrole et du gaz s'échappent des puits de combustibles fossiles, des minerais sont extraits par les puits de mines, des humains s'y enfoncent quand il s'agit de puits comme celui de la Pierre Saint-Martin ou tous autres lieux fréquentés par les spéléologues. De la connaissance peut émerger, quand on fore pour connaître, mais il est ici délicat de parler de puits de connaissance... Pourtant, ce qui sort du puits est aussi un bien connu : la vérité ! Mais il s'agit certainement ici d'un puits sans fond.

Un puits d'enfer !

Le forage sg3, aussi nommé forage profond de Kola ou de Zapoliarny, a été entrepris par l'URSS à partir de 1970 et stoppé en 1989 à la cote - 12 262 m. L'objet de ce forage était d'atteindre - 15 000 m pour tenter de comprendre ce qu'est le Moho, cette discontinuité dans la vélocité sismique et les processus de transferts thermiques existant entre la croûte terrestre et le manteau, correspondant à des différences de roches très marquées (granite/péridotite métamorphique). Cette discontinuité décrite par Mohorovicic semble générale sur la planète Terre. Bien des acquis scientifiques ont été obtenus à l'occasion de ce forage, qui n'a jamais été réédité, même s'il a été tenté aux États-Unis et en Allemagne depuis. L'arrêt du forage est dû à la conjonction de deux faits : la fin de la guerre froide, avec la chute du mur de Berlin et l'éclatement de l'empire soviétique ; des difficultés techniques associées aux températures et pression très élevées – contraintes que personne n'a réussi à dépasser aujourd'hui.

Contons les faits. Alors que les géologues foraient, foraient, foraient toujours, et remontaient des pierres vieilles de 2,5 milliards d'années, le trépan de la tige de forage se serait mis à tourner à une vitesse invraisemblable, et sans commune mesure avec l'énergie développée par leurs machines. Après avoir retiré l'outil de forage, ils observent alors l'envol hors du puits, dans un nuage vaporeux, d'une créature ailée aux yeux maléfiques ; puis affirment

.../...

.../...
avoir entendu des cris humains terrifiants, en ayant pris soin de s'assurer que ces cris ne provenaient pas de leurs équipes. Ils ont estimé avoir percé les portes de l'enfer. Le puits est toujours là, bien calme et ne sentant pas le soufre. Il n'est donc pas scientifiquement avéré qu'ils aient vraiment découvert l'enfer ! Mais nul doute que le travail dans la presqu'île de Kola soit éprouvant...

17. Y a-t-il de la Terre dans l'espace ?

De la Terre avec un grand T, il y en a dans l'espace. Il s'agit de projections expulsées de la planète dans son jeune âge par l'impact d'astéroïdes. Nous connaissons bien l'un de ces éjectats : la Lune, qui serait un gros morceau de Terre arraché par la percussion d'un astéroïde gigantesque, à l'aube du système solaire (50 millions d'années après sa naissance, soit à un centième de son âge actuel). L'hypothèse est étayée, entre autres, par la composition chimique de la Lune, très similaire à celle de la Terre.

Et de la terre avec un petit t, peut-on dire qu'il y en a ? Les dernières sondes envoyées sur Mars ont révélé des minéraux formés par l'altération des roches martiennes en présence d'eau, en particulier des argiles, des oxydes de fer et des sels. Et l'on sait depuis longtemps que les inondations martiennes ont érodé ces sols, répandus des alluvions en contrebas des volcans martiens. Il y a donc certaines similitudes entre les sols martiens et les sols terrestres. Bref, il y a sûrement, sur les planètes telluriques (c'est-à-dire faites de matériaux solides, comme ceux de la Terre, et non pas de gaz) que l'on découvre chaque année par dizaines hors du système solaire, des sols qui se sont formés par interaction entre leurs roches et leurs atmosphères. Sans doute de natures très diverses, comme ceux qu'on peut imaginer sur Titan, le gros satellite de Saturne, qui seraient faits glace d'eau et d'hydrocarbures, lessivés par des pluies de méthane liquide, ou sur Europe, satellite de Jupiter, qui seraient composés de glace d'eau posée sur des silicates et balayés par un très léger vent d'oxygène.

Si l'on considère que, pour faire de la terre, il faut aussi la matière organique formée par les organismes vivants, alors les planètes candidates sont sûrement moins nombreuses. De nombreux auteurs de science-fiction ont proposé de transformer diverses planètes pour les rendre semblables à la Terre et habitables par l'homme, créant le terme « terraformation ». Ils ont pensé à reconstituer l'atmosphère et le climat, mais il nous semble qu'un élément essentiel de la « terraformation » sera de former de la terre, du sol, à même de porter une biosphère et de recycler ses éléments pour boucler les cycles biogéochimiques.

18. Où sont passées les météorites ?

Dans notre terre bien sûr, et aussi au fond de l'océan. Il y a donc de la matière extraterrestre dans nos sols. Elle peut venir de la ceinture d'astéroïdes située entre Mars et Jupiter ou de comètes. Certaines météorites viennent même de la planète Mars : il s'agit de matière qui a été éjectée de cette planète à la suite d'un violent choc par un astéroïde, puis qui, après de longues pérégrinations dans l'espace et de multiples changements d'orbites, a finalement croisé la Terre.

Les météorites ont une composition variée, pouvant contenir du fer et du nickel comme le noyau de notre planète, des silicates et parfois du calcium et de l'aluminium comme notre croûte terrestre, ou enfin contenir du carbone, en proportions diverses et assemblées de différentes manières, selon qu'elles proviennent de la nébuleuse initiale qui a donné le système solaire, de corps planétaires déjà formés ou de noyaux de comètes. Cependant, les quantités reçues sur Terre actuellement restent modestes. La planète rencontre sur sa trajectoire chaque année près de 100 000 tonnes de matière interplanétaire, dont 15 000 à 20 000 tonnes touchent le sol (objets les plus gros qui ne se sont pas consumés dans l'atmosphère). Accumulé pendant 10 000 ans, même si l'on compte les poussières de ce qui s'est consumé, cela ne représente cependant que 1 à 2 g par mètre carré, soit moins d'un cent-millième du poids du sol.

Plus important a été, par le passé, l'impact des grosses météorites sur l'ensemble de notre système terrestre car elles ont bouleversé de façon cataclysmique le climat, l'atmosphère et les organismes vivants. On sait maintenant que, parmi les extinctions massives d'espèces connues datant de 500, 440, 360, 252, 200 et 65 millions d'années, plusieurs auraient coïncidé avec des impacts météoritiques. Chacun de ces événements a modifié de façon durable le climat et rayé de la planète 50 à 95 % des espèces, mais permis plus tard l'essor de nouvelles formes du vivant.

Les météorites nous ont-elles apporté la vie ? En 1996, une étude américaine a fait grand bruit en relatant avoir découvert sur une météorite martienne les traces de ce qui aurait pu être une bactérie, d'où une énième hypothèse de vie martienne et d'origine exobiologique de la vie terrestre. Mais plusieurs équipes françaises ont trouvé peu après, sur une autre météorite, tombée à Tataouine dans le Sud tunisien en 1931, des traces similaires qu'ils ont pu attribuer sans ambiguïté à une colonisation de la météorite, après sa chute, par une bactérie bien terrestre. Plus sérieusement,

on a détecté dans certaines météorites plusieurs des espèces chimiques organiques qui constituent nos protéines et nos acides nucléiques, d'où l'idée que les briques élémentaires du vivant étaient déjà présentes dans l'espace, et que les météorites nous ont donc apporté, sinon la vie, au moins des ingrédients.

19. En quoi les sols lunaires sont-ils différents des sols terriens ?

Caractériser un sol, c'est s'intéresser aux horizons superficiels (entre 0 et - 2 m, par exemple) d'une planète pour tenter d'en décrire à la fois les états et les fonctions. Dans la mesure où notre référence est la planète Terre, les caractéristiques des sols lunaires peuvent être examinées par comparaison avec celles de la Terre. C'est à la pédologie (la science et la connaissance des sols) que l'on fait appel pour décrire les sols et leurs fonctions. Le sol (terrestre) peut être défini comme l'interface, ô combien fragile, entre l'air, l'eau, les minéraux et les êtres vivants. L'air et l'eau occupent l'espace poral, soit environ 40 à 45 % du volume d'un sol. Le complément à 100 % est la phase solide.

Sur la Lune, il n'y a pas d'atmosphère. On ne rencontre qu'environ 5×10^{-13} molécules de gaz par mètre carré, soit une masse totale de gaz de l'ordre de 10 tonnes pour toute la Lune. Si l'on a trouvé des traces d'eau dans les zones polaires lunaires, les quantités disponibles semblent très limitées. La température y varie de 200 °C à 110 °C et cette planète reçoit des flux permanents de météorites, de particules et de rayonnement solaire. C'est dans cet environnement que les roches existant à la naissance de la Lune, il y a environ 4,5 milliards d'années, ont été transformées. L'ensemble des bombardements de toute sorte sur ces roches primitives a abouti à de la poussière, des cailloux et des verres résultant de la fonte des roches primitives. Aux roches primitives se sont ajoutés des écoulements volcaniques il y a environ 3,5 milliards d'années.

Les principaux minéraux trouvés sur la Lune sont, comme sur Terre, des silicates. C'est d'ailleurs à partir de l'oxygène de ces silicates que les responsables des programmes « d'occupation » de la Lune ont imaginé, avec de l'hydrogène qui serait véhiculé depuis la Terre, fabriquer de l'eau, indispensable à tout vivant mais quasiment absente sur la Lune !

En ce qui concerne les éléments chimiques, l'histoire commune de la Terre et de la Lune, et la continuité de l'espace, font que l'on retrouve dans l'horizon de surface lunaire les mêmes éléments que sur Terre, dans des fréquences proches pour P, K, Ca, Mg et quelques autres éléments

prioritaires pour constituer la vie. L'absence d'eau, et de carbone en quantité suffisante, fait qu'il n'y a pas de matières organiques. La Lune est donc encore, aujourd'hui, un astre mort au sens de la biologie. Aucun horizon lunaire superficiel ne ressemble physiquement et chimiquement à un horizon superficiel de la planète Terre. C'est pourquoi les spécialistes préfèrent parler, pour la Lune, non de sols, mais simplement de régolithes. En effet, seules les fonctions de support et de réserve de matériaux de construction peuvent être mises en œuvre sur la Lune. De tels matériaux pourraient même être utilisés comme support de culture, pour autant qu'ils ne contiennent pas trop d'éléments potentiellement toxiques, tel le chrome.

En conclusion, c'est parce qu'il n'y a pas eu de processus pédologiques impliquant l'eau (quasiment absente) et la vie (totalement absente) que les horizons de surface de la Lune ne peuvent assumer la totalité des fonctions de nos « bons vieux sols ».

20. À quoi nous servent les sols ?

Mais à marcher dessus, bipèdes terrestres que nous sommes ! Sans lui nous ne marcherions que sur un chaos de pierres et tomberions dans toutes sortes de failles et de gouffres horribles.

Plus sérieusement, à la fin du siècle dernier, on a commencé à définir et classer les différents services que les sols rendent à l'humanité, afin de pouvoir en faire une approche économique. Le *Millenium Ecosystem Assesment*, un ouvrage scientifique collectif international de 2005 coordonné par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement, a proposé un cadre avec ce que les auteurs ont nommé « services écosystémiques » : les services que nous rendent les écosystèmes. Ainsi on distingue pour les sols :

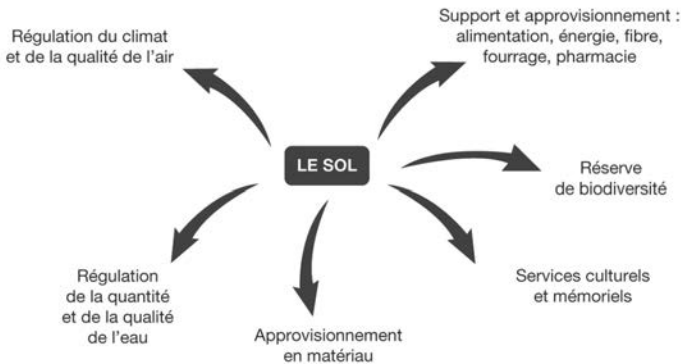
- les services de support et d'approvisionnement : les sols peuvent être sources de matériau de construction ou de pigments, support de nos infrastructures et des constructions elles-mêmes ; support et source de la production agricole et sylvicole, celle-ci pouvant fournir de l'alimentation, de l'énergie, des matériaux (bois, coton, lin, chanvre, sisal et autres fibres), des médicaments et des drogues (tabac, opium, et bien d'autres) ;

- les services de régulation : les sols, par les grandes quantités d'eau qu'ils peuvent retenir, régulent les crues et les inondations, ainsi que les quantités d'eau disponible. En jouant le rôle de filtre physique, chimique et biologique, le sol optimise la qualité de l'eau. Les sols peuvent contribuer à l'épuration de certains déchets. Les sols assurent aussi la dispersion de nombreux parasites. Depuis les années 1990, on a pris conscience que,

de plus, ils influent considérablement sur le climat car ils peuvent émettre ou absorber les gaz à effet de serre ;

– les services culturels : c'est dans le sol qu'on enterre nos morts ; nous lui confions donc nos ancêtres et leur mémoire. Il conserve et archive les traces des civilisations passées. C'est le sol de l'archéologue. Et puis il y a le sol du paysager, qui contribue à la qualité esthétique ou récréative de notre environnement ;

– enfin, il est un réservoir de diversité génétique immense, et encore insondée : il y a bien plus d'espèces dans le sol qu'au-dessus, même si elles sont moins visibles. Au-delà de la biodiversité que l'on appelle fonctionnelle (l'ensemble et la variété des organismes assurant les fonctions qui nous rendent les services précédents), il y a une diversité génétique tout court, importante pour elle-même, dont on ne sait pas toujours, ou pas encore, si elle sert, mais dont on sait qu'elle a été élaborée par des centaines de millions d'années d'évolution et qu'il est urgent de ne pas la faire disparaître en quelques dizaines d'années.



Les services des sols

Cette classification des services est loin d'être parfaite. Des économistes, ou des philosophes comme Virginie Maris, nous diront qu'elle mélange des notions hétérogènes (par exemple des biens comme l'eau, l'alimentation, la terre elle-même, et des services comme la régulation) et qu'elle participe d'une représentation marchande (les « bénéfiques »). Néanmoins, cette vision d'ensemble des services variés et parfois antagonistes est indispensable. Par exemple, un sol acide sera mauvais pour le charme mais bon pour le châtaignier ; un sol argileux gonflant et profond sera très bon pour l'herbe mais très mauvais pour la maçonnerie ; une population de vers de terre qui dépose de beaux gros turricules à la surface du sol sera excellente en culture fruitière, mais catastrophique sur un green de golf ; une gestion du sol bonne pour la production agricole pourra être mauvaise pour la qualité de l'eau, etc. Cependant, une chose est sûre : perdre le sol fait perdre tous ces services à la fois.

Chapitre 2

Le sol vivant

21. Qu'est-ce qui grouille et fossoie dans les sols ?

On distingue la faune (les animaux) des microorganismes ou microbes, terme qui regroupe les bactéries, les champignons et les Archaea. La faune du sol est classée en macrofaune, qui mesure plus de 2 mm, en mésofaune, qui mesure entre 0,2 mm et 2 mm, et enfin en microfaune, inférieure à 0,2 mm. On considère qu'un sol en bonne santé héberge, en moyenne, une faune composée de très nombreuses espèces de vertébrés, d'une bonne demi-douzaine d'espèces de vers de terre, d'environ 25 espèces d'acariens, d'une cinquantaine d'espèces d'insectes (collembolles, fourmis, coccinelles...) et de quelques centaines d'espèces de nématodes.

Le régime alimentaire de chaque catégorie de cette faune illustre leur rôle écosystémique. Le type de régime, donc la fonction dans les écosystèmes, ne dépend pas de la taille des animaux ! Les plantes, avec l'énergie chimique qu'elles captent grâce aux processus photosynthétiques, sont au départ de la chaîne alimentaire tellurique : elles sont les producteurs primaires. Un groupe de premiers organismes consomme les végétaux : les herbivores. Et on trouve aussi bien des vertébrés, comme les lapins, les mulots ou les marmottes, que des nématodes ou des larves d'insectes, comme les vers blancs, larves de coléoptères. Cette faune constituée essentiellement d'herbivores représente les consommateurs primaires, qui

Termites et vers de terre

Les termites, ou fourmis blanches, sont des arthropodes tantôt détritivores tantôt prédateurs, qui fréquentent en priorité, mais non exclusivement, les milieux tropicaux. Ces individus très sociaux construisent des labyrinthes et des nids très complexes. Il y en a plus de 2 000 espèces. Sous des cieux tropicaux, la croissance des plantes sur des termitières abandonnées, est toujours très supérieure à celle des terres avoisinantes, mais il s'agit d'un transfert de fertilité.

Les vers de terre ont une bien longue histoire puisqu'ils fréquentent nos sols depuis le Mésozoïque, il y a environ deux cents millions d'années. Aristote, l'élève de Platon, les considérait comme les intestins de la terre. Chez les Égyptiens, ils étaient tellement sacrés que Cléopâtre en interdisait l'exportation. Mais ces animaux sont hermaphrodites et ce caractère biologique a peut-être fait que l'abbé Rozier, dans son *Cours complet d'agriculture*, en 1880, les considérait comme des êtres malfaisants.

Charles Darwin leur a redonné des lettres de noblesse. Les vers de terre consomment des débris organiques de toute nature, ainsi que les champignons et bactéries qui les habitent. Ils ingèrent de 5 à 10 fois leur poids de terre par jour et, de ce fait, brassent la terre et y font des galeries souvent favorables au passage des racines. De plus, comme ils se nourrissent préférentiellement de matières organiques qu'ils choisissent, les teneurs en éléments nutritifs qu'ils rejettent dans les turricules sont supérieures à celles des sols dans lesquels ils se déplacent.

Bien qu'ils existent aussi dans les milieux tropicaux, les vers de terre sont certainement les macroorganismes les plus emblématiques des sols des régions tempérées, en raison de leurs effets très positifs sur les propriétés physiques des sols. Ce sont néanmoins de piètres indicateurs des pollutions chimiques des terres.

22. Les habitants du sol sont-ils paisibles ?

« Qu'il repose en paix », dit-on parfois à celui qui va sous terre. En est-on si sûr ? Nous connaissons sur terre ou dans l'océan les grandes chaînes alimentaires, ou réseaux trophiques, qui font se succéder plantes ou phytoplancton, herbivores, carnivores et super-prédateurs. Le sol aussi a ses réseaux trophiques, et la dure loi de la jungle y règne tout autant. Les microbes s'y taillent la part du lion : ils représentent, par rapport aux animaux, la majorité écrasante des flux de biodégradation et de la biodiversité.

Au départ est la production primaire, c'est-à-dire les plantes et quelques algues. Les plantes se consomment mortes ou vivantes. Toutes sortes de ravageurs ou pathogènes les attaquent par les racines : larves d'insectes, vers, microbes. Si elles sont mortes, on nomme saprophytes ceux qui les consomment. Les plus nombreux sont les champignons et les bactéries. À leur tour, ceux-ci sont dévorés vivants par d'autres organismes qui sont à peine plus gros qu'eux, en fait suffisamment petits pour pouvoir progresser dans les étroits pores du sol et y brouter les microbes. Il s'agit de protistes comme les amibes, qui déforment leur unique cellule pour la refermer sur les bactéries, et de petits vers omniprésents : les nématodes. Ces derniers (du groupe des vers ronds ou némathelminthes) mesurent souvent moins d'un millimètre de long. Ils peuvent être parasites ou saprophytes et ne doivent pas être confondus avec les vers de terre (du groupe des annélides oligochètes, ce qui veut dire qu'ils sont annelés et un peu poilus), dont ils sont très distants géniquement. Plus gros, les arthropodes occupent toutes sortes de niches écologiques et sont représentés par tous les groupes : des crustacés comme les cloportes, des arachnides comme les acariens ou les pseudo-scorpions, des mille-pattes, et une multitude d'insectes et leurs larves fouisseuses.

Parmi ceux-ci, un groupe de petits insectes primitifs, celui des collemboles, est fréquent, aux côtés des très présents fourmis et termites. Parmi les grands prédateurs appartenant au monde des invertébrés, on rencontre en Europe le prestigieux, très utile et menacé carabe doré.

Ce petit monde s'envoie les pires venins. Il y a des venins que nous connaissons bien, fabriqués par les champignons ou des bactéries pour éliminer d'autres bactéries concurrentes ou ennemies : les antibiotiques. D'autres bactéries, notamment du genre *Pseudomonas*, chassent avec des molécules à propriétés tensioactives comme nos lessives, mais à base de lipopeptides ou liposaccharides – des *biosurfactants*, en anglais – qui font tout simplement exploser la membrane des cellules de spores ou autres proies.

Si les nématodes sont fort consommateurs de champignons, certains champignons, qui ne sont pas saprophytes mais prédateurs, semblent venger leurs confrères. La palme de la cruauté revient sûrement à ceux-ci, qui tendent des nœuds coulants pour étrangler le nématode de passage. Il se débattrait jusqu'à ce que les sucs et enzymes de son chasseur l'aient digéré : ces quelques centaines d'espèces de champignons, principalement du groupe des Orbiliaceae, ont inventé les collets. Ils chassent soit avec

des lassos, soit avec des organes adhésifs, qu'ils développent seulement au contact des nématodes. Les pseudo-scorpions, longs de quelques millimètres, chassent avec le venin de leurs pinces et font aussi une digestion externe de leurs minuscules proies. L'inoffensif ver de terre, lui, est la proie rêvée des carnivores. S'il n'est pas happé par quelque volatile en s'aventurant dans le monde de l'air et de la lumière, il subira l'attaque aveugle du monstrueux prédateur parfaitement adapté au sol : la taupes.

Mais le sol n'est pas que lieu de tueries : il abrite une infinité de mystérieuses alliances. Les microbes, souvent très spécialisés, doivent travailler ensemble en consortium dans la biodégradation. Les champignons sont indispensables à beaucoup d'autres groupes, car ils réalisent l'oxydation de la lignine des fibres végétales permettant l'accès aux autres composés. Un bel exemple de symbiose est celui des termites champignonnistes, qui cultivent soigneusement les champignons *Termitomyces*. Ceux-ci vont pré-digérer pour les termites la matière végétale. Les plantes, aussi, libèrent par leurs racines quelques nectars sucrés, que l'on nomme exsudats racinaires. Elles entretiennent des populations bactériennes qui leur sont bénéfiques, ou attirent les champignons avec lesquels elles vont s'associer.

Devant l'immense diversité des organismes réunis en un même sol, on comprend que les interactions entre eux, qu'il s'agisse de relations trophiques, d'antagonismes, de symbioses ou de facilitations, sont encore plus nombreuses. Et, sachant qu'on ne connaît qu'une minorité des microorganismes présents, on réalise à quel point il est nécessaire de respecter les équilibres entre les organismes du sol, mais aussi de limiter les intrants toxiques ou polluants en agriculture et de préserver ou restaurer la qualité des sols. C'est tout l'enjeu de la gestion écologique, au sens premier du terme : l'étude des interactions entre les organismes et des organismes avec leur milieu.

23. Quelles bactéries trouve-t-on dans les sols ?

Savez-vous que, dans une seule poignée de terre, il y a couramment plusieurs milliers d'espèces de bactéries différentes ? On n'a d'ailleurs connaissance de ce chiffre que depuis les années 2000 environ.

Dans le monde des bactéries, le terme « espèce » a une définition un peu particulière. C'est l'analyse de la séquence d'un gène commun qui le définit : quand ce gène a plus d'un certain pourcentage de similitude entre deux bactéries, on dit qu'elles sont de la même espèce. C'est donc l'extraction directe de l'ADN bactérien et le séquençage de ce gène qui

permet de sonder la biodiversité (voir question 41). Mais comme on est loin d'avoir examiné tous les organismes, c'est par le calcul qu'on a estimé cette biodiversité.

Dans les années 2010, à chaque fois que des chercheurs isolent un génome bactérien du sol, ils ont encore une forte probabilité de tomber sur une espèce nouvelle, inconnue. Il y a une raison à cela. Avant l'essor de la biologie moléculaire, on isolait et cultivait les bactéries en laboratoire pour les identifier. Or on s'est rendu compte que la plupart des bactéries des sols ne sont pas cultivables, car on ne connaît pas les conditions pour les faire pousser. C'est donc un monde immense et encore largement inconnu, auquel s'ajoute un autre règne du vivant, celui des Archaea, (autrefois nommées archéobactéries) plus primitives, souvent adaptées à des conditions difficiles et aussi très nombreuses dans les sols.

L'humain du ^{xxi}^e siècle, en particulier celui qui est assez éloigné de la nature, a parfois une image négative de la bactérie, or les bactéries sont d'abord nos alliées indispensables, et les alliées des plantes. Elles sont à l'origine de la plupart des transformations chimiques dans le sol : cycle du carbone, de l'azote, du soufre, fermentations, production et consommation du méthane. Aux côtés des champignons, elles assurent la biodégradation des matières organiques et contribuent à l'altération des minéraux. Beaucoup favorisent la croissance des plantes. Dans le milieu naturel, l'ensemble des communautés bactériennes est composé en écrasante majorité de souches bénéfiques et, parce que celles-ci occupent le terrain, elles sont le premier rempart contre l'intrusion et l'installation des bactéries néfastes, pathogènes des cultures ou des animaux. Ce sont donc les premiers agents de prévention des maladies infectieuses ! Cette règle est d'ailleurs valable aussi pour le corps humain.

Une synthèse liste, en 2006, les dix genres de bactéries les plus représentés dans les sols. Ils ont pour petits noms, dans l'ordre : *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Arthrobacter*, *Mycobacterium*, *Flavobacterium*, *Paenibacillus*, *Clostridium*, *Actinoplanes*, *Streptomyces*, et *Hyphomicrobium*. Pourtant, à elles toutes, elles représentent moins de 5 % des individus des sols. Certaines ont des activités remarquables. Les Rhizobiacées s'associent aux racines des légumineuses et leur permettent d'assimiler l'azote de l'air, les consortiums de *Nitrosomonas*, *Nitrospira*, *Nitrosobolus*, *Nitrobacter* assurent la nitrification (transformation de l'azote en nitrates). Certaines donnent à la terre son odeur, comme l'abondant groupe des actinobactéries (autrefois nommées actinomycètes), dites aussi bactéries filamenteuses car les

cellules s'associent en filaments. Mais il y aussi de redoutables pathogènes pour les plantes parmi les genres *Erwinia*, *Pseudomonas*, *Agrobacterium*, *Streptomyces*, *Xanthomonas*.

On sait aussi depuis plus longtemps estimer la masse des microbes vivants (Archae, bactéries et champignons confondus) : c'est la biomasse microbienne. Elle est maintenant estimée en routine par certains laboratoires d'analyse de sol. Elle s'élève généralement à plusieurs centaines de grammes de matière sèche par mètre carré de sol. En fait, cette biomasse n'est que très partiellement corrélée à l'activité microbienne car la majorité des microbes sont en dormance ou à très faible activité. Les actifs dans cette société-là ne représentent donc qu'une petite minorité.

Le monde immense des bactéries du sol nous assène des chiffres vertigineux. Plusieurs dizaines de millions d'individus par gramme de terre. Plusieurs centaines de milliards de tonnes sur la planète. Des rythmes de reproduction de plusieurs générations par jour. Une diversité énorme, supérieure à celle des plantes et des animaux réunis. Cependant, cet univers est encore à découvrir.

24. Qui a la plus belle maison de terre ?

La terre, grâce à l'argile qu'elle contient, est un matériau de choix pour ériger de véritables édifices. Dans la terre vivent des corporations de bâtisseurs qui creusent, déplacent et édifient sans arrêt. Les écologues les appellent les « ingénieurs du sol ». Sous les tropiques, les fourmis et les termites sont le plus représentés.

Pour construire les maisons, ce sont bien les termites les plus forts, et parmi leurs divers groupes, les grands bâtisseurs appartiennent à ceux que l'on appelle « champignonnistes ». Les termitières cathédrales du genre *Macrotermes* en Afrique peuvent atteindre la hauteur d'immeubles de deux voire trois étages. La composition de leurs murs, épais et couverts d'un enduit très résistant à l'extérieur, est la même que celle du torchis : mélange d'argile et de débris végétaux, mais améliorés par de la salive et des excréments. Ces maisons ne sont pas seulement belles, elles mériteraient le label « haute qualité environnementale » : outre le matériau bio, elles bénéficient d'un système de climatisation et de maintien de l'humidité exemplaire, grâce à leur orientation et à un réseau complexe de ventilation. Bon bilan social aussi, car, contrairement aux apparences, la biodiversité – la mixité pourrait-on dire – dans ces immeubles est assez importante : des centaines d'espèces d'autres insectes y sont tolérées. Comme certaines de nos fermes,

ces termitières abritent aussi des cultures pour la consommation des habitants. Il s'agit ici de cultures de champignons du genre *Termitomyces*, qui prédisent pour le compte des termites les débris végétaux en dégradant la lignine. La culture a lieu dans une pièce spéciale.

Plus modestes mais peut-être plus familiers, les nids de l'hirondelle de fenêtre, construits en assemblant une à une des boulettes de boue, constituent aussi de belles petites maisons de terre. Très joli aussi, le nid des guêpes maçonnes comme celles du genre *Eumenes*, dites « potières » car le nid est en forme de petit pot qui contient des proies puis sera fermé par un opercule pour abriter la larve pendant sa croissance. La guêpe et l'hirondelle nous montrent que la terre-matériau voyage aussi par transporteur aérien.

25. Qui fait les plus gros terriers ?

De nombreuses espèces creusent des terriers, pour y nicher, s'y mettre l'abri des intempéries et des prédateurs, ou pour chasser. Il peut s'agir de vers, de mollusques, d'insectes, d'araignées, de reptiles ou de mammifères. Les escargots font de modestes chambres pour y déposer soigneusement leur ponte. Parmi les araignées, beaucoup de mygales chassent à l'affût dans leur terrier plutôt que sur une toile. Certains insectes sont même spécialisés dans le creusement, comme les courtilières dont les pattes avant ont la forme de puissantes palettes fouisseuses qui ressemblent étrangement à celles des taupes.

Mais si l'on cherche les plus grands terriers, il faut regarder du côté des mammifères. Les terriers des animaux vivant en colonies (les immeubles donc) sont plus grands que ceux des solitaires (les maisons individuelles). Ceux des marmottes ou des chiens de prairie américains peuvent avoir 15 à 20 pièces. Ces dernières comprennent des nurseries, des dortoirs et des chambres pour l'hiver. De plus, elles sont ventilées par un astucieux système d'aspiration de l'air par les bouches d'entrée. Bien visible aussi, les galeries du campagnol terrestre qui, dans les prés de montagne, fait son chemin entre sol et neige et laisse à la fonte un réseau d'innombrables tunnels aériens. Les animaux creuseurs de terre sont diversement appréciés par l'humain. Même la taupe, insectivore plutôt utile, est mal aimée pour les monticules qu'elle forme. Les plus détestés sont sûrement le rat musqué et le ragondin, espèces invasives introduites respectivement d'Amérique du Nord et du Sud, au siècle dernier, qui sapent les digues et les berges des rivières.

Pour le plus gros terrier, le recordman en Europe est le blaireau, gros mustélide, solitaire, discret sauf pour son terrier, visible par ses énormes déblais devant l'entrée. En effet, le blaireau déplace couramment plusieurs dizaines de tonnes de terre et de pierres ; son terrier peut s'étendre sur quelques centaines de mètres carrés et avoir plusieurs dizaines d'entrées.

Un nid d'archives

Un intéressant record de nid souterrain est celui du plus durable, détenu par diverses espèces de rongeurs du sud-ouest de l'Amérique du Nord, du genre *Neotoma*, dénommés là-bas *packrat* ou *woodrat*. Ce petit animal a de mauvaises manières bien particulières : il vole toutes sortes d'objets de son environnement, des branches, graines et débris végétaux, et il aime aussi les objets brillants ; dans son nid, en général une cavité naturelle ou une grotte, il les empile en un gros tas d'ordures sur lequel il urine. Avec le climat sec, son urine cristallise et emprisonne tous ces déchets dans une sorte de résine, si bien que ces déchets vont être conservés pendant des durées pouvant atteindre 50 000 ans. De l'« ambre » de *packrat* en quelque sorte !

C'est pour cela qu'il est devenu l'ami des archéologues et aussi des paléoclimatologues : à partir de ces anciens nids fossiles, on peut identifier la végétation du passé, retrouver des traces de civilisations, ou reconstituer le climat grâce à des analyses chimiques et isotopiques des restes. Au point que les archives des tas d'ordures du *woodrat* sont devenues les bases de données scientifiques de référence des paléo-environnements locaux du très sérieux service géologique des États-Unis (USGS).

26. Pourquoi les oiseaux avalent-ils des cailloux ?

Ces animaux sans dents sont apparus sur Terre probablement il y a 63 000 000 d'années, à la fin de l'ère secondaire. Comme leur célèbre premier représentant, l'archéoptéryx, ils ont dû se débrouiller pour se nourrir. Pour cela, ils ont emprunté à certains de leurs ancêtres reptiles la technique du gésier pour transformer en purée leurs aliments. Le gésier, une poche très musclée, se trouve, chez les oiseaux, à la suite de l'œsophage et avant l'estomac. L'épaisseur de ses parois musculaires varie avec le régime alimentaire. Cette poche permet aux granivores de broyer les graines, broyage grandement amélioré si l'oiseau a ingéré de petites pierres (gastrolithes) : elles vont se stocker dans le gésier pour jouer le rôle de meules.

Les bienfaits de la soupe aux cailloux

Ce qui est bon pour les oiseaux ne vaut pas pour les humains ! Par contre, pas besoin d'être édenté pour goûter une soupe aux cailloux, spécialité lorraïne ou portugaise (connue là-bas sous le nom de *sopa di pedra*).

Il s'agit d'une soupe paysanne à base de légumes d'hiver (pomme de terre, poireaux, navets, carottes), salée, additionnée selon les cas de lard fumé ou de saucisses, voire d'une poule, et à laquelle on joint un galet. Si la cuisson a lieu à petit feu pendant 3-4 heures, le galet en perpétuel mouvement écrase les différents ingrédients et en affine la texture. De plus, en fonctionnant comme un accumulateur de chaleur, il écrête les pics de température... Certes, nous semblons un peu loin du sol, mais les ingrédients de cette soupe en sont des émanations directes !

27. Quel est le plus grand organisme vivant sur Terre ?

Un membre du groupe *Armillaria melleae*, l'armillaire couleur de miel, tient actuellement le record. Il s'agit d'un individu de l'armillaire d'Ostoya, dont la taille, plus de 8 km², est celle d'un « rond » de champignons.

Chacun connaît bien la partie épigée des champignons, avec pied et chapeau, que l'on appelle carpophore et qui est l'organe reproducteur. Ce n'est que la partie visible d'un ensemble bien plus grand de filaments appelés mycélium, qui courent dans le sol. Les ramasseurs de champignons savent que les carpophores sont souvent disposés en cercle plus ou moins grands, parfois appelés « ronds de sorcière ». C'est d'un tel rond dont il s'agit. Des chercheurs de l'Ontario et du Michigan ont publié ce scoop dans la revue scientifique *Nature* en 1992 à propos d'une *Armillaria gallica*, l'armillaire bulbeuse en français, s'étalant sur 15 hectares. D'une part, ils ont démontré par analyse de l'ADN que toutes les parties de ce champignon constituent un clone, issu d'une même cellule. D'autre part, ils ont montré que tous les filaments et carpophores sont reliés et communiquent entre eux. Ces deux conditions font qu'on peut parler d'un individu unique. Ils ont estimé la masse du mycélium et cet exemplaire-là pèse plus de 10 000 kg. Depuis, d'autres chercheurs ont trouvé l'individu record en Oregon, dépassant sûrement la centaine de tonnes. Cette armillaire est un champignon pathogène qui contribue à tuer les arbres en envahissant les racines. Celle-là serait âgée de plus de 2 400 ans, confirmant que les champignons ne comptent pas seulement parmi les plus gros, mais aussi les plus âgés des organismes vivants de notre terre.

On commence seulement à sonder la biodiversité fongique des sols grâce à l'analyse de l'ADN que l'on peut en extraire (voir question 41). Des études menées en France dans les années 2000 montrent qu'une seule placette forestière peut contenir plusieurs milliers d'unités taxonomiques (l'équivalent des espèces), dont la majorité n'est pas encore connue. Il y a donc probablement encore quelques géants ou organismes improbables à découvrir, juste sous nos pieds.

28. À quoi sert le sol pour une plante ?

Pour la plante, le sol, cette couche très superficielle de notre planète Terre, est TOUT. Même si l'homme a appris à faire se développer des plantes hors sol, il faut insister sur le fait que les associations sol-plante constituent, et constitueront très longtemps encore, le fondement de tous nos écosystèmes fonctionnels, les plantes ayant été, et étant toujours, directement ou indirectement, à la base de toute notre nourriture.

Lorsque la « mauvaise saison » est passée, que la température et l'humidité deviennent favorables, le sol se met à jouer le rôle d'un cocon, mieux, d'un berceau, qui, à partir des réserves de constituants organiques et d'éléments minéraux accumulés dans la graine durant la « belle saison » précédente, favorise la germination de la graine. Durant cette germination apparaissent quasi simultanément, d'une part, une plantule qui rejoindra rapidement l'atmosphère (la partie aérienne et photosynthétique d'une plante est destinée à fournir rapidement à cette dernière l'autonomie énergétique indispensable) et, d'autre part, une racine qui doit durablement assurer des relations intimes et efficaces entre le sol et la plante.

Ainsi, pour une plante, l'ensemble des constituants minéraux et organiques des sols, ainsi que les organismes morts et vivants qu'il recèle, permet, grâce à sa structure meuble et ses propriétés physique, chimique et biologique, un développement « normal » des racines des végétaux, que ceux-ci soient ou non cultivés. Le sol cache 15 à 20 % de la masse végétale des plantes, accumulée sous forme de racines fonctionnelles indispensables. Les racines assurent d'abord l'ancrage du végétal. Et, pour reprendre un terme du patois charentais, le sol lui sert d'« abouterde », devenant ainsi « soutien de famille » : la famille de toutes les plantes présentes dans une parcelle. Lorsque, après 2 à 3 semaines, les réserves des graines s'amenuisent, la fonction « berceau » du sol s'estompe.

La plante doit devenir autonome. Les racines, en puisant dans le sol, relayeront la graine pour fournir les éléments nutritifs qui seront utilisés,

avec les produits primaires de la photosynthèse, pour constituer le matériel végétal et, à terme, permettre la formation d'une nouvelle graine. Pour ce faire, comme tout organisme vivant, les racines ont besoin de respirer : c'est pourquoi le sol doit toujours favoriser la circulation des gaz. Les racines se mettent alors à explorer le sol pour l'exploiter : en extraire l'eau et les éléments nutritifs indispensables aux végétaux (25 ou 26 éléments). Le sol devient pour eux un garde-manger actif : réservoir de nutriments et source d'eau qu'il faut sans cesse renouveler car, pour produire 3 kg de matière sèche, le sol doit libérer environ 1 m³ d'eau !

Les mécanismes mis en jeu pour la fourniture des éléments nutritifs sont variés :

- pour les éléments minéraux, tels P et K, c'est la plante qui, en les prélevant dans la solution du sol, déclenche leur libération depuis la phase solide du sol jusqu'à la solution. Ce mécanisme est renforcé par des propriétés chimiques et physiques des différents constituants des terres ;

- pour quelques éléments, le sol fonctionne « à la demande ». L'azote (consommé par les végétaux principalement sous forme d'ammonium ou de nitrate) et l'essentiel du soufre prélevé sont mis à la disposition des racines par des microorganismes présents dans les terres, qui minéralisent la matière organique accumulée au cours de décennies, voire de siècles.

On sait maintenant que les microbes impliqués dans les transformations biologiques de l'azote et du soufre répondent parfois à la demande de la plante, mais ce n'est pas toujours le cas. Cela peut poser des problèmes soit de manque de nourriture azotée pour les plantes soit d'excès de nitrates, qui seront lessivés (car non prélevés) et rejoindront les nappes. La synchronie entre offre du sol et besoin des plantes pour l'azote et le soufre n'est jamais assurée à coup sûr !

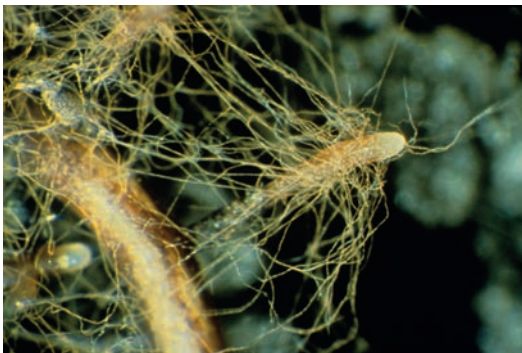
Le sol constitue aussi l'habitat de nombreux auxiliaires microbiens et fongiques bénéfiques aux plantes. Enfin, comme fosse commune où sont mélangés les résidus végétaux et les constituants des terres, le sol est un cimetière très efficace vis-à-vis des végétaux. Les actions complémentaires des arthropodes déchiqueteurs et consommateurs de résidus végétaux et de milliards de microorganismes telluriques, y assurent la fonction indispensable au maintien de la vie sur terre. Sans le recyclage de tous les éléments nutritifs indispensables aux plantes, aux animaux et aux humains, la vie disparaîtrait. C'est pourquoi, en termes de pédologie, on est en droit d'affirmer que les plantes ont largement contribué à la création des terres, tout particulièrement en y injectant des matières organiques.

En conclusion, du point de vue des végétaux, le sol sert à aller du berceau au tombeau pour pouvoir recommencer !

29. Les champignons font-ils pousser la forêt ?

Ils ne sont pas les seuls à le faire, mais ils ont un rôle considérable. De nombreuses espèces de champignons forestiers forment avec les racines des arbres de la forêt une association étroite et durable qui apporte aux deux organismes des bénéfices réciproques. Cette association symbiotique est dénommée mycorhize, du grec myco, « champignon » et rhizo, « racine ». Ces symbioses concernent plusieurs familles d'arbres forestiers et il s'agit alors principalement d'ectomycorhizes (le champignon reste à l'extérieur des cellules des racines).

Champignon et jeune racine se reconnaissent mutuellement et s'associent. Depuis 2014, on sait que le champignon prend le contrôle de sa plante-hôte en lui injectant une petite protéine qui neutralise ses défenses immunitaires. Ensuite il entoure la racine d'un manchon alors que les autres extrémités de ses filaments vont coloniser le sol. Ils échangent eau et nutriments. L'arbre apporte surtout le carbone, donc l'énergie. Quant au champignon, il est capable de dégrader les matières organiques pour en obtenir les éléments nutritifs, azote et phosphore en particulier. Il peut aussi dissoudre les minéraux au moyen d'acides organiques pour en obtenir fer, calcium, potassium et encore du phosphore. Enfin, en prolongeant les racines, il démultiplie la prospection du sol par l'arbre, pour en tirer l'eau et tous ces éléments.



Ectomycorhizes sur des racines de chêne. L'extrémité de la racine courte est recouverte par le champignon, dont les filaments partent explorer le sol.

Dans ces associations, on trouve quelques centaines d'espèces de champignons. Parmi eux, les meilleurs de notre gastronomie : les cèpes, les girolles, les lactaires et la truffe ! D'autres symbioses existent où des champignons spécialisés, de la division des Gloméromycètes, forment avec de très nombreuses plantes des endomycorhizes à arbuscules, ainsi dénommés parce qu'ils pénètrent dans les cellules des racines en y faisant une petite arborescence.

La plupart des plantes, en particulier celles qui sont pluri-annuelles, vivent ainsi en symbiose avec des champignons. La symbiose est d'ailleurs le cas général : la quasi-totalité des organismes, plantes, insectes, l'homme aussi, vivent en symbiose avec des bactéries, et les champignons eux-mêmes hébergent des bactéries dans leurs cellules.

Un spécialiste mondial des mycorhizes, Francis Martin, dit avec humour que c'est l'arbre qui est un prolongement ou un appendice du champignon et non pas l'inverse, car l'arbre, en dotant le champignon de feuilles haut placées, assure pour le compte de ce dernier la photosynthèse, capte le carbone et l'énergie lumineuse. Pourquoi pas ? En tout cas, les deux partenaires ont coévolué depuis quelques dizaines de millions d'années.

30. Y a-t-il plus de racines ou de champignons dans le sol ?

Les biologistes du sol ne comptent pas les quantités de champignons en nombre d'individus, mais en masse ou en longueur d'hyphes, les filaments élémentaires des fibres blanchâtres visibles à l'œil nu, le mycélium. Ces hyphes font environ 10 μm de diamètre, sont assemblés en fibres et en réseaux et courent dans le sol. La partie émergée des champignons (« épigée » doit-on dire), les carpophores ou autres organes reproducteurs, chers au ramasseur ou au gourmet, ne sont qu'une infime partie de « l'iceberg ». Dans des sols, forestiers ou non, il y a couramment quelques dizaines à centaines de mètres d'hyphes par gramme de terre. La densité de racines dans un sol est fréquemment de l'ordre de quelques millimètres de distance entre deux racines, ce qui correspond déjà à plusieurs décimètres par gramme de sol. En mètres, il y a donc bien plus de champignons que de racines. Cette unité est pertinente pour les deux, qui visent à coloniser la plus grande partie du sol pour capter les éléments nutritifs ou l'eau. Si l'on compte en poids, il y a cependant plus de racines. En nombre d'espèces, les champignons sont vainqueurs : on sait depuis peu, grâce aux mesures moléculaires, qu'il y a plusieurs centaines d'espèces de champignons par mètre carré.

Mais racines et champignons ne sont pas en compétition, loin de là. Les champignons assurent de très nombreuses fonctions dans l'environnement, au premier rang desquelles la biodégradation et la minéralisation des matières organiques, le recyclage des éléments nutritifs, la contribution à la nutrition hydrique et minérale des plantes, en plus du rôle spécifique assuré par les mycorhizes. Ils contribuent également à la stabilité physique de la terre et à son aération, ce qui limite l'érosion ou le tassement des sols. Bactéries et champignons constituent l'essentiel de la biomasse des sols, avec des biomasses d'ordre de grandeur équivalent.

31. Jusqu'où vont les racines des arbres ?

En extension horizontale, les systèmes racinaires des conifères et des fagacées (hêtres, chênes, châtaigniers) ont couramment un rayon deux à trois fois plus grand que le houppier. Claire Atger, qui a étudié les systèmes racinaires de quelques espèces, a décrit l'arbre qui est probablement le recordman connu à ce jour : un *Ficus nymphaeifolia* en Guyane française dont le système racinaire a un rayon moyen de 90 m, et dont une racine traçante était longue de 150 m. C'est une espèce proche du caoutchouc d'appartement. Pour ce qui est de la profondeur, c'est encore plus difficile à savoir. La croissance et la longueur des racines des arbres dépendent beaucoup du milieu, en particulier de la limitation en eau. Ainsi c'est en pays secs qu'on rencontrera des racines profondes pour aller y chercher l'eau. Christophe Jourdan, du Cirad, rapporte que des eucalyptus de 40 m de haut ont couramment des racines jusqu'à 30 m de profondeur, et que celles des palmiers peuvent aller à – 50 m. Des spéléologues témoignent avoir croisé des racines à plus de 50 m de la surface, quand les failles leur permettent de descendre sans contrainte.

Les racines d'un végétal remplissent quatre fonctions principales : ancrage de la plante, nutrition minérale, alimentation hydrique et mise en réserve de matière pour produire de nouveaux organes après la saison sèche ou pendant une année difficile. Mais les racines ont aussi pour fonctions de faire des trous pour aérer le sol et permettre l'infiltration de l'eau, de libérer des exsudats qui alimenteront les microbes du sol, de produire des matières organiques qui vont conférer au sol de bonnes propriétés physiques.

En général, l'extension latérale permet d'optimiser le prélèvement des éléments nutritifs libérés, comme l'azote, par les litières ; l'extension en profondeur et en volume celui de l'eau et des éléments associés aux minéraux. On dit des mycorhizes qu'ils sont un prolongement des racines : ils augmentent la densité de prospection mais aussi la taille de la zone prospectée.

32. Comment le pin et le châtaignier poussent-ils sur les sols pauvres ?

Sous les climats tempérés, les sols acides, développés sur sable quartzeux, grès ou granite, sont particulièrement pauvres en éléments nutritifs. Certaines essences forestières sont mieux adaptées que d'autres à ces milieux et les colonisent facilement. C'est le cas du pin sylvestre et du châtaignier, communs en Europe.

Les facteurs de cette adaptation sont nombreux, mais une étude américaine des années 1990 a démontré que la production de composés phénoliques et de tannins en quantité importante dans leurs feuilles l'explique en grande partie. Ces composés sont ceux qui colorent en brun les feuilles mortes. Au cours de la biodégradation, les litières libèrent des phénols, qui ont la propriété d'être bactéricides, en particulier envers les bactéries qui transforment l'azote organique en nitrate. Or l'ion nitrate est mobile dans les sols, de sorte qu'il encourrait le risque d'être lessivé sous l'action des pluies d'automne et d'hiver. Ainsi, l'azote n'est pas perdu mais, mieux encore, il peut être directement assimilé sous forme organique par des champignons.

Si ces champignons ont établi des mycorhizes avec les racines d'un arbre, l'azote est transféré directement à l'arbre. Cela montre que l'adaptation de nombreuses espèces végétales à leur milieu vient non pas de leurs seules propriétés écophysiologicals les plus évidentes, mais peut-être autant de leur capacité à interagir positivement ou négativement avec les organismes du sol. Ici, plusieurs communautés du sol sont concernées. Un bel exemple d'écologie évolutive.

33. D'où vient l'humus des forêts ?

Le terme *humus* (« la terre », en latin) peut désigner les matières organiques du sol en général, mais aussi, en forêt, les couches organiques les plus superficielles des sols. Cette matière organique vient des feuilles des arbres et, sous les premiers centimètres, des racines.

L'humus est composé de plusieurs couches successives dont la morphologie et le nombre sont déterminés par la nature des organismes décomposeurs. Les scientifiques parlent des « horizons O », composés de plus de 60 % de matière organique. Typiquement, dans les formes dénommées *moder*, on rencontre, de haut en bas :

- la première couche OL (pour litière) des feuilles de l'année ;

- des couches OL de feuilles partiellement fragmentées des années précédentes ;
- puis une couche dénommée OF (pour fermentation), mélange de débris très fins et de déjections de petits arthropodes ou de petits vers et de racines fines. OL et OF sont abondamment colonisées par les champignons ;
- suit une couche OH (pour humus), noire, d'aspect colloïdal, composée d'une accumulation de boulettes fécales et de résidus insolubles issus de la biodégradation des couches OF. Des datations ont montré que la matière des couches OH provient de feuilles tombées il y a vingt à cinquante ans, en moyenne ;
- ensuite, dès qu'on touche le minéral, on parle d'horizons organo-minéraux A.

Mais d'autres morphologies existent : si le sol est riche en vers de terre, les horizons OH voire OF sont absents car les litières sont consommées et enfouies par les vers. Leur équivalent se retrouve mélangé aux horizons organo-minéraux. Ce sera seulement le cas des sols peu acides, neutres ou alcalins car les vers de terre ne supportent pas les milieux trop acides. Si les conditions très froides ou acides ralentissent l'activité biologique, les horizons organiques peuvent s'accumuler sur une à quelques dizaines de centimètres dans un humus dénommé *mor*. Une très forte pollution métallique peut aboutir au même résultat. Pour l'œil expert du forestier, la morphologie des humus est un bon indicateur des conditions physico-chimiques et biologiques du sol.

Et nous retournerons...

Le mot latin *humus* aurait une origine commune avec *homo* (l'homme, le Terrien), qui semble apparaître dans « humain » et « humanité ». L'humus occupe une place importante dans notre inconscient collectif parce qu'il symbolise la richesse de la terre nourricière, mais aussi peut-être parce que l'humus est le devenir de l'homme, après son inhumation.

34. Les matières organiques se renouvellent-elles ?

La dynamique du carbone organique du sol est relativement simple. On peut comparer le carbone à une population (par ex. celle d'un pays) : l'effectif de la population résulte de la différence entre les entrées dans la vie (les naissances) et les sorties (les décès). C'est à peu près le produit du nombre annuel de naissances par l'espérance de vie à la naissance, plus les

données d'immigration et d'émigration. Dans le sol, le carbone naît grâce à l'apport annuel de la végétation, ses systèmes racinaires, ses litières et les résidus de cultures ; le décès correspondrait à la respiration des décomposeurs du sol : la transformation en CO_2 . L'équivalent de l'espérance de vie à la naissance s'appelle « temps moyen de résidence (ou de renouvellement) ». Quant à l'immigration, ce serait l'apport d'amendements, et l'émigration la perte organique par érosion. Une différence entre le carbone des sols et les humains : 80 à 90 % du carbone organique apporté va disparaître en moins de quelques années, tandis qu'une portion de 10 à 20 %, protégée, va résider beaucoup plus longtemps (quelques dizaines d'années sous les tropiques, quelques siècles en climat tempéré). Le carbone se renouvelle donc, mais lentement. Sa matière organique est la mémoire de ce qu'il a reçu pendant les derniers siècles. Un peu de carbone perdure aussi plusieurs milliers d'années ; il représente une minorité du carbone en surface mais la majorité en profondeur. La gestion du carbone organique est fondée sur un principe simple : plus la végétation et les amendements apportent de carbone, plus il y aura de matières organiques à long terme. Cependant, augmenter la quantité de matière organique jusqu'à un nouvel équilibre est une opération de longue haleine.

Plus complexes sont les facteurs de variations du temps moyen de résidence, qui traduit l'efficacité des décomposeurs. Outre les facteurs minéralogiques et climatiques, ils dépendent de la gestion. Les comparaisons entre systèmes non cultivés (forestiers, par exemple) et cultivés (comme les céréalicultures intensives) sur les mêmes sols montrent qu'il y a moins de matières organiques dans les sols cultivés. Pourtant, dans les systèmes céréaliers où l'on retourne au sol les tiges et feuilles non récoltées en plus des racines, les apports organiques (300 à 500 g de C/m²/an) sont, en raison de la très forte productivité primaire de ces systèmes, plus importants que les apports moyens en forêt. La différence de carbone entre les deux systèmes tient donc au fait que les microorganismes sont plus efficaces dans les sols cultivés, et que la matière organique y est dégradée plus vite. À cela, plusieurs raisons : pas de limitation des microbes par les éléments nutritifs ; une exposition de la terre labourée aux intempéries, qui rompt les assemblages entre argile et matière organique et la rend plus accessible aux microbes ; des prédateurs des microbes déprimés par les pesticides et, si le système est irrigué, une humidité aux périodes chaudes très favorable à la biodégradation. Les sols d'agriculture intensive ont donc une activité microbienne intense. À l'inverse, la richesse et l'activité de leur faune sont très réduites.

Le dilemme de l'activité biologique

Une forte activité microbienne est souvent considérée comme bénéfique. Mais plus les organismes décomposeurs sont actifs et efficaces, plus la matière organique est dégradée vite : à apport égal, moins il y en a ! On ne doit donc pas rechercher une activité biologique maximale. Afin d'augmenter les quantités de matières organiques, on pourrait préférer la ralentir un peu. Ainsi, pour un flux moyen annuel de libération d'éléments nutritifs N et P équivalent, on pourrait constituer un gros réservoir d'éléments, moins rapidement disponibles, mais assurant une grande résilience à l'agrosystème (voir question 71). Les leviers sont cependant encore à évaluer.

35. Les lichens ont-ils inventé le sol ?

Le lichen est une association symbiotique de deux espèces de règnes différents : une algue unicellulaire ou une cyanobactérie, et un champignon, voire les trois. Cette association a la propriété de tirer son énergie de la lumière et son carbone de l'air, grâce à la photosynthèse de l'algue, et d'utiliser l'azote de l'air, encore grâce à l'algue, qui réduit le diazote N_2 en azote organique. Dans l'association, le champignon assure l'architecture, la collecte des éléments minéraux, capte l'humidité de l'air et conserve l'eau. Le couple est capable de résister à des conditions extrêmes de température, de sécheresse et de rayonnement.

La croissance lente du lichen exige peu de ressources. C'est pourquoi beaucoup d'espèces sont pionnières, colonisant les milieux les plus pauvres avant toute autre. Ainsi, certains lichens pourront s'installer sur les rochers, y formant une croûte plaquée à la roche.

En sécrétant des acides organiques comme l'acide oxalique, ainsi que des acides lichéniques complexes, le champignon peut dissoudre les minéraux les plus durs pour en tirer les éléments minéraux, créant, là où il s'incruste, un petit horizon d'altération de quelques millimètres d'épaisseur. On peut donc dire que cet organisme fabrique son sol.

On peut dire aussi qu'il initie parfois le processus de pédogenèse. Ce sera le cas sur les nouvelles coulées de lave, sur les surfaces libérées par le retrait des glaciers, les éboulis, mais aussi sur les toits de lauzes, le ciment, nos monuments. Les lichens étant pionniers, lors de la colonisation de nouveaux territoires, le petit sol qu'ils ont formé permettra l'arrivée successive d'autres organismes : mousses, puis végétaux supérieurs.

36. Des déserts bien vivants ?

Un désert n'est pas une zone totalement vide mais presque vide de végétation. Ce fait résulte de conditions peu propices à la vie, en raison soit de la présence d'un sol impropre à la végétation soit d'une pluviométrie très faible, par exemple inférieure à 100 mm d'eau par an, et très mal répartie dans le temps. Dans ces zones arides, la population humaine est toujours inférieure à 5 habitants au km².

Pourtant, en s'agenouillant, on peut observer la colonisation d'une partie de la surface par du vivant. Ces écosystèmes de quelques décimètres carrés ou mètres carrés peuvent même couvrir des zones plus importantes dans le Sahel, dans le nord du Canada ou en Sibérie, où le recul de certains glaciers a mis à jour des zones de rochers considérées comme stériles. Ces petits espaces vivants, nommés croûtes microbiotiques ou croûtes biologiques de surface, sont des écosystèmes en construction.

En fait, des zones initialement dépourvues de vie peuvent être colonisées, *ab initio*, par des microorganismes pionniers véhiculés par les courants d'air, dès lors que ces microorganismes peuvent adhérer aux surfaces minérales qui se présentent – ces milieux étant souvent dépourvus de matière organique. Ces bactéries sont fréquemment des cyanobactéries qui possèdent des capacités fonctionnelles métaboliques originales. Photosynthétiques, elles accumulent à partir du CO₂ minéral aérien quelques composés organiques. Elles en excrètent une fraction, en particulier des polysaccharides, qui leur permettent d'adhérer aux surfaces minérales. Celles-ci libèrent ensuite d'autres éléments tels P, K, Mg, Ca et quelques oligoéléments, indispensables à tout être vivant.

De plus, certaines espèces de cyanobactéries sont fixatrices d'azote. Grâce à cette double fonction de fixation et de transformation de carbone et d'azote minéral en composés organiques, base de toutes les matières organiques, elles représentent le point de départ de toute possibilité de végétation. Des algues vertes et quelques autres bactéries hétérotrophes vont se joindre à elles. L'ensemble de tous ces pionniers crée ainsi une couche organique vivante à la surface du sol, la première croûte biologique de surface. Puis des champignons filamenteux et des lichens s'implantent sur ces croûtes et assurent leur croissance. Cet assemblage de constituants minéraux et de matières organiques constitue bien le principe de création d'un sol. Certaines croûtes peuvent atteindre plus de 5 cm d'épaisseur. Aux États-Unis, on a pu estimer par datation leur croissance, de l'ordre du siècle pour former 1 cm.

Néanmoins, ces zones de croûtes biologiques de surface sont très sensibles à de nombreux processus de dégradation conséquents de stress, que ceux-ci soient naturels (sécheresses excessives et prolongées) ou d'origine anthropique (feu, piétinement des animaux, des humains, des véhicules).

37. Les sols peuvent-ils digérer nos déchets ?

Oui et non... Pour le comprendre, revenons aux bases de la chimie : distinguer les éléments chimiques des molécules.

Les éléments chimiques (les 82 éléments du tableau périodique H, He, Li, Be... Pb, Bi, sans compter les radioactifs) ne disparaissent jamais. Les molécules, elles, sont constituées d'éléments assemblés par des liaisons chimiques. Ces édifices peuvent se défaire et se transformer en d'autres, donc disparaître. Les microbes des sols sont particulièrement efficaces pour détruire les composés organiques biodégradables (on dit aussi fermentescibles : les produits d'origine végétale et animale comme nos déchets alimentaires, les déjections des animaux et de l'homme, les déchets verts, la cellulose du papier, du carton ou du coton, le bois non traité, les protéines de la laine ou du cuir, même certains plastiques). Mieux encore, les éléments libérés pourront améliorer les sols et nourrir les plantes si l'on n'en met pas trop. Ils peuvent être digérés par les sols directement ou sous forme de composts (prédigérés, donc).

Malheureusement, nos déchets comprennent aussi des molécules organiques non biodégradables (ou très lentement), qui viennent de la chimie de synthèse ou des produits de combustion, et les microbes ne se sont pas adaptés à leur utilisation : il peut s'agir des plastiques (la plupart d'entre eux), de peintures, de pneus, de bitumes, de produits chimiques ou pharmaceutiques de toute sorte, et maintenant de nanomatériaux à base de carbone. Ceux-là ne peuvent pas être digérés ; de plus, beaucoup seront toxiques. Il y a aussi les matières minérales et les éléments métalliques : les éléments qu'ils contiennent ne disparaîtront pas. Si certains ne dérangent pas trop, comme le fer ou l'aluminium des boîtes, le silicium du verre, beaucoup sont des toxiques, comme les métaux lourds. Nos piles et nos batteries, notre électronique, nos peintures et les colorants des emballages sont pleins de ces métaux.

Le plus gros volume des déchets fermentescibles réside dans les effluents des animaux d'élevage, puis ceux de l'homme. Les fumiers (solides) et lisiers (liquides), traditionnellement rapportés aux sols, ne sont d'ailleurs pas toujours considérés comme déchets. Mais la concentration

des productions d'élevage fait que certaines régions sont excédentaires en effluents (pollueuses car ni le sol ni les plantes n'arrivent à absorber ces déchets), alors que d'autres ont des terres appauvries mais pas d'élevage. La logique du recyclage voudrait soit que l'on redistribue les activités dans les régions, soit que l'on transporte les effluents.

Quant aux effluents de l'homme, il faut et il suffit ici de rappeler les propos de Justus von Liebig dans sa treizième « Lettre sur l'agriculture moderne » (1859) : « Il est impossible de se faire une idée chez nous du soin que les Chinois mettent à tirer parti des matières fécales de l'homme ; pour eux, elles sont le suc nourricier du sol ; celui-ci ne doit sa fertilité qu'à cet agent énergétique ». En 1921, C.V. Garola en rajoutait une couche : « Rendre au sol ces excréments, c'est lui restituer une grande partie des matières que les récoltes antérieures ont enlevées. Cependant, presque partout, dans notre beau pays de France, on laisse perdre, dans les villes et dans les campagnes, ces matières fécales dont la restitution au sol doit être considérée comme un impérieux devoir ! » Aujourd'hui, ces vérités anciennes sont peut-être moins directement applicables, car les effluents de l'homme contiennent médicaments, contraceptifs et autres perturbateurs endocriniens dont on ne connaît pas encore bien le devenir dans les sols. Les produits sanitaires pour les animaux causent aussi des problèmes : le zinc et le cuivre apportés aux porcs pour améliorer leur croissance finissent par polluer les sols où l'on étend trop de lisier. On sait également que les résidus d'antibiotiques donnés aux animaux d'élevage, qui arrivent finalement aux sols, ont déjà provoqué la propagation de gènes bactériens de résistance à ces antibiotiques.

En conclusion, ce ne sont pas les déchets qu'il faut faire disparaître, mais la notion même de déchet. Sachant que :

- la partie fermentescible, qui contient les éléments azote et phosphore en particulier, DOIT être recyclée en agriculture, donc essentiellement dans les sols ;
- les métaux lourds, eux, ne doivent pas arriver aux sols mais être recyclés dans l'industrie ;
- les polluants organiques persistants doivent être éliminés, ou mieux, n'avoir jamais été ;

la seule solution est que ces catégories de déchets soient séparées. Chacun de nous est responsable : on sait par exemple, d'après les données de l'Ademe en 2012, que moins de 40 % des piles et accumulateurs portables sont collectées en déchets spécifiques. Les 60 % restants sont encore

probablement mélangés avec les déchets fermentescibles ! Bien au-delà du tri de nos poubelles, on doit substituer maintenant à la notion de déchet la notion de recyclage et organiser les filières non plus selon des « produits », mais en système production-distribution-consommation-recyclage. Les trois catégories de déchets doivent être séparables dès la production et la distribution. Et, tant que la séparation des composés néfastes et toxiques ne sera pas suffisante, on devra continuer à ne pas épandre nos déchets ménagers ou nos eaux d'épuration sans contrôle préalable de leur qualité.

38. Les plantes peuvent-elles vraiment dépolluer des sols ?

La phytoremédiation des sols pollués fait appel à deux principes distincts : soit éliminer le contaminant qui pollue, soit l'immobiliser sur place, pour qu'il n'atteigne pas les cibles vivantes *via* un transfert dans l'air, l'eau, la végétation ou les écosystèmes aval. On réservera le terme « dépolluer » au premier principe, et on ne parlera ici que des polluants chimiques. Parmi ceux-ci, il faut distinguer deux catégories principales :

- les éléments chimiques toxiques, radioactifs ou non ; les plus fréquemment cités sont des métalloïdes comme l'arsenic ou le sélénium, et des métaux, tels le cadmium, le chrome, le cuivre, le plomb ;
- des molécules organiques, comme des molécules de synthèse, ou des produits pétroliers.

Les produits organiques potentiellement toxiques trouvés dans les sols sont des milliers, ce sont le plus souvent des sous-produits « oubliés » de productions industrielles. Parmi les plus fréquemment cités : les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) tel le naphthalène, des polychlorobiphényles (PCB). Les nanoparticules ne sont pas encore entrées dans la liste, mais tous les espoirs sont permis...

En bref, les méthodes de phytodépollution des métaux recourent à l'extraction par le végétal ; celle des polluants organiques, à la biodégradation facilitée par le végétal. Pour extraire les métaux, les scientifiques sont allés chercher des plantes qui colonisent spontanément les sols naturellement riches en métaux toxiques, typiquement les sols de gisements miniers. Parmi ces plantes, certaines ont développé une stratégie de tolérance aux métaux : elles prélèvent le métal et l'éliminent dans les vacuoles des cellules, ou dans des feuilles qui meurent ensuite. Certaines peuvent accumuler plus de 2 % de leur poids de matière sèche sous forme de métaux : *Alyssum bertolonii* prélève le nickel, *Arabidopsis halleri* et *Thlaspi caerulescens* (le « tabouret bleu », maintenant nommé *Noccaea caerulescens*), le zinc et

le cadmium. Sachant que ces plantes sont petites et de croissance lente, on voudrait idéalement disposer de plantes qui allient une forte productivité et une forte extraction. La sélection et l'ingénierie s'emparent actuellement de cet objectif de différentes manières : en sélectionnant, en hybridant les espèces, en introduisant les gènes des accumulatrices dans les plantes cultivées, etc.

Cette technologie végétale peut être complétée par une ingénierie du sol. En effet, les métaux existent sous des formes chimiques plus ou moins mobiles et biodisponibles, en fonction des conditions du milieu. Mais jouer sur cette biodisponibilité pose un dilemme : plus le métal est mobile, mieux il sera prélevé par la plante, mais plus il risque de rejoindre les eaux et de contaminer d'autres lieux. Voici un exemple d'ingénierie développée par l'université de Nanjing, en Chine : on alcalinise et on tasse les parties profondes du sol, le tout faisant une barrière à l'infiltration des métaux vers la nappe, mais en même temps on acidifie la partie superficielle du sol, y rendant le métal mobile et on y plante des associations de plusieurs espèces accumulatrices qui extraient les métaux.

Les méthodes de biodégradation des polluants organiques assistées par le végétal font aussi appel au fonctionnement de la rhizosphère : typiquement, les plantes libèrent par les racines des composés organiques qui agissent soit directement sur le polluant, soit indirectement en stimulant l'activité de bactéries ou de champignons. En même temps que l'on met en place la culture, on inocule le sol avec des microbes choisis pour des rôles spécifiques, par exemple la production de tensioactifs rendant les polluants solubles, ou d'enzymes spécialisées dans la dégradation des polluants.

Les méthodes de phytoremédiation progressent, mais les limites de cette approche sont assez bien cernées : plusieurs, voire de très nombreuses dizaines d'années sont requises pour extraire les métaux, et il est difficile d'installer de façon durable les microorganismes dans le sol. De plus, il y a plusieurs façons de concevoir la phytoremédiation : elle peut parfois n'être qu'une espèce de cache-misère lorsqu'on l'envisage comme outil de restauration esthétique du paysage, en recouvrant l'horizon supérieur du sol pollué par d'autres résidus industriels (en principe non polluants) : en quelque sorte, un sol de synthèse pour y implanter de la végétation paysagère. Dans les friches industrielles, là où l'industrie gît, la culture doit surgir ; tel pourrait être le cri de ralliement de tous les conseillers de la phytoremédiation !

En 2015, la phytoremédiation semble une technologie durable dans la mesure où son moteur est la photosynthèse, mais il importe de la valider à l'échelle de réalité du monde économique, même si des promoteurs de cette technique la disent peu onéreuse. Oui, les plantes peuvent dépolluer des sols. Surtout si on a la vie devant soi ; mais comme le temps, c'est de l'argent, nombreux sont ceux qui n'attendent pas et préféreront la pelle mécanique...

39. Les champs maudits sont-ils un mythe ?

Dans ces champs, tous les animaux, surtout des bovidés mais aussi des moutons, qui venaient paître mouraient rapidement, parfois sans signe apparent de maladie. Les humains qui s'occupaient des animaux pouvaient également succomber au même mal. Ce fléau est connu de longue date. Il a été décrit en Égypte il y a environ mille cinq cents ans avant notre ère. Virgile conte également cette maladie chez les humains qui travaillaient la laine des moutons. Des épidémies sont apparues à peu près une fois par siècle. Il a fallu attendre la fin du XIX^e siècle pour que Robert Koch démontre que cette maladie, contre laquelle Louis Pasteur trouvera un vaccin cinq ans après la découverte de Koch, était due à un bacille, *Bacillus anthracis*, qui, en se développant, conduit à la maladie nommée charbon ou anthrax.

La particularité de ce bacille, essentiellement anaérobie, est de survivre longtemps, au moins une décennie, lorsqu'il s'enkyste sous forme de spores. Avant la découverte de Koch, tout animal mort était enterré sur place ; le bacille s'enkystait mais ses spores restaient potentiellement actives dès qu'elles pouvaient entrer dans un autre animal. La survie de ces spores était fonction de l'écologie du milieu dans lequel elles se trouvaient. C'est la raison pour laquelle un terme populaire anglais désigne le charbon (maladie) comme celle des tireurs de laine, qui se contaminaient en inhalant les spores. Cette maladie animale reste présente, mais diffuse, sur toute la planète. La seule stratégie efficace reste la vaccination des animaux puisque tous, à l'exception des oiseaux, peuvent la contracter. L'OMS et la FAO suivent particulièrement les foyers chaque fois qu'il en ressurgit.

La maladie de la vache folle, ou encéphalite spongiforme bovine, maladie à prions comme la tremblante du mouton, a posé des problèmes identiques. En Écosse, des éleveurs ayant enterré dans des prairies des moutons fous, d'autres moutons consommant l'herbe sur ces sites ont été contaminés.

Le tétanos est-il tapi dans le sol ?

Le tétanos est une maladie infectieuse aiguë, toujours grave, et mortelle dans 30 % des cas. Elle est due à la présence d'un bacille ubiquiste qui sporule, *Clostridium tetani*, anaérobie strict. Ce dernier point est central pour lutter contre le tétanos, dont les spores sont retrouvées dans la terre, les poussières, sur les plantes et des objets rouillés, dans les selles animales – 10 à 25 % des selles humaines semblent en contenir.

En effet, certaines bactéries, dans les situations qui leur sont écologiquement difficiles, forment des spores qui résistent à presque tous les stress environnementaux naturels, en particulier la sécheresse et le gel. Les spores, qui pénètrent dans l'organisme par une plaie, peuvent y survivre des mois, voire des années, jusqu'à ce que des conditions leur soient écologiquement favorables, en particulier un environnement anaérobie tel que des tissus nécrotiques ou des corps étrangers. La spore peut alors germer et redevenir un bacille, sécrétant la toxine responsable des symptômes de la maladie.

En 1854, Simpson fait la relation entre la présence d'une plaie et la maladie tétanos. La découverte de la toxine en 1890 permet de commencer la production de sérum en 1897. Le vaccin ayant été mis au point en 1924, les premiers à en bénéficier furent les militaires, dès 1936. À cette époque, l'omniprésence des chevaux était source de multiples cas de tétanos. Aujourd'hui, le tétanos cause environ 500 000 morts/an dans le monde à cause de vaccins pas à jour ou pas faits.

40. Peut-on manger de la terre ?

La géophagie est pratiquée dans des situations où le manque de nourriture est criant, soit structurellement, soit en raison de catastrophes naturelles majeures tels des tremblements de terre ou de longues sécheresses, voire des inondations massives, qui ont détruit des récoltes et parfois même tué des agriculteurs.

La sous-nutrition chronique et durable est présente dans des campagnes et des bidonvilles de zones géographiques chaudes. Pour tromper leur faim, des humains se mettent alors à ingérer des galettes de terre dont argiles et limons sont souvent un constituant majeur, les sables ne pouvant guère être avalés. Certains, pour améliorer l'aspect gustatif, après avoir débarrassé la terre de ses graviers et gros débris par filtration sur une toile grossière,

ajoutent dans cette boue un peu de sel et de graisse d'origine improbable. Ils réussissent même à gagner de l'argent en vendant de telles galettes.

Mais tromper la faim n'est pas nourrir. La terre ne peut nous fournir les nutriments dont nous avons un impératif besoin. Faire une utilisation directe de notre terre nourricière n'est pas sans risque sanitaire. La géophagie un tant soit peu prolongée entraîne des accidents : appendicites, carences de toute nature et en particulier ferrique, intoxications lorsque la terre contient des composés toxiques (minéraux ou organiques) et infections parasitaires en tout genre. Il faut donc la proscrire absolument. En outre, des scientifiques qui ont étudié des zones minières, notamment dans le Massif central, ont montré que la plus grande part des métaux toxiques trouvés dans certaines légumes était sous forme de salissures de terre contaminée sur le végétal.

Pourtant, consommer des argiles n'est pas systématiquement néfaste pour la santé, comme le prouve le Smecta, en cas de troubles intestinaux bien identifiés. Ce médicament, délivré sans ordonnance, contient, entre autres composants, une smectite, c'est-à-dire une montmorillonite : nous sommes en présence d'une argile gonflante à grande surface spécifique (jusqu'à 700 m²/g). Cette aptitude à adsorber des gaz et des cations ou à tapisser notre estomac est la fonction utilisée en tant que médicament. Cependant, choisir seul son argile dans la nature reste déconseillé, même lorsque ce choix est le fait de pédologues avertis ou d'agronomes sages !

41. Vers une empreinte génétique des sols ?

Il existe un domaine de la science de sols où des progrès rapides laissent entrevoir des perspectives révolutionnaires : celui de l'analyse de l'ADN des sols. On sait que tous les êtres vivants portent dans leur ADN un code univoque et personnel. Qu'en est-il des sols ? Se pourrait-il que chaque parcelle agricole, chaque forêt, ait une signature génétique non falsifiable, qui décrirait sa composition, son histoire, son usage ? Peut-être... mais que de difficultés et de défis. Les cellules de chaque partie vivante, racines, invertébrés, microorganismes, dont les cadavres vont former la matière organique des sols, contiennent de l'ADN. Dans le principe donc, l'ADN du sol devrait s'alimenter de toute la diversité de la vie qui l'anime.

Globalement, cette molécule est chargée négativement, et aura donc tendance à s'adsorber sur les charges positives des sols, argiles et oxydes métalliques, mais aussi sur certaines associations organiques. Cependant, l'ADN est un assemblage moléculaire rendu fragile par la mort des cellules.

Cette molécule contient une proportion élevée d'azote et de phosphore, des éléments fortement recherchés par les microorganismes du sol. Par ailleurs, cette molécule n'est pas stable en milieu acide. Aussi la fragmentation et la dégradation de l'ADN des organismes est-elle généralement rapide, sauf dans des situations particulières.

Des études récentes utilisant les réseaux de mesure de la qualité des sols (RMQS) ont recherché une signature génétique globale des sols. Ce type d'approche ne vise pas à connaître l'ensemble du génome conservé du sol, mais à amplifier, pour l'analyser, une partie de ce génome, que l'on sait plus variable en fonction des organismes qui le portent et qui est encadrée par des parties invariables. Sur ces parties invariables, on fixe des amorces, qui déclenchent le processus de polymérisation et permettent la multiplication des fragments ciblés. Ensuite, la variabilité de ces séquences est analysée.

Les résultats sont à la fois triviaux et intéressants. Triviaux car le principal facteur structurant les différences de composition biologique du sol serait... son acidité ! On le savait par des techniques traditionnelles, voilà une confirmation un peu cher payée ! Intéressant car on perçoit beaucoup plus de finesse, mais qui demande une approche complémentaire, appelée séquençage massif. Là on découpe l'ensemble du génome extrait et on analyse tout ! Des milliards de séquences dont une partie peut être déjà largement dégradée. Et on demande à une discipline nouvelle, la bio-informatique, de reconstruire les séquences initiales et de rechercher dans les bases de données mondiales les analogies avec des séquences de référence, des repères, un ordre. Cette révolution est en marche.

Une autre approche consiste à rechercher des sites où l'ADN se conserverait mieux, plus longtemps, en raison de facteurs climatiques, hydrologiques ou géochimiques. Quelques exemples : dans une séquence de 15 sols superposés, préservés par le gel dans une plaine intérieure de l'Alaska, des chercheurs ont extrait et amplifié des portions caractéristiques d'ADN de mammoth et de cheval datés de 8 000 à 10 000 ans, c'est-à-dire d'un âge bien plus récent que le dernier fossile connu. Cet ADN provient probablement de poils, de fèces, épanchés à la surface du sol et conservés depuis. Des études indépendantes suggèrent que l'ADN bactérien pourrait se conserver près d'un million d'années dans des sols gelés. Au fond de mares disséminées dans les chênaies de Lorraine, dans des couches datées de la période gallo-romaine, on a identifié des

fragments d'ADN de mouton et des champignons vivant dans leurs déjections, signant ainsi l'usage par les pasteurs antiques d'espaces que l'on croyait (à tort) forestiers depuis toujours.

Enfin, les amas organiques accumulés au fond de terriers de rongeurs et protégés de la dégradation par la cristallisation d'urée ont été récemment exploités par ces techniques moléculaires pour décrire les environnements passés des climats désertiques (voir question 25).

Chapitre 3

Sol et agriculture

42. Comment les alluvions ont-elles nourri les anciennes civilisations ?

L'homme, en additionnant ses compétences aux capacités des milieux naturels humides, a commencé à cultiver à l'époque néolithique, il y a quelque douze mille ans. C'est dans les vallées du Tigre et de l'Euphrate qu'auraient eu lieu les premières cultures de l'ancêtre du blé, l'aénilops, époque où, en semant une graine on en récoltait en moyenne deux ! Quant au riz, si avide d'eau, il serait cultivé depuis environ onze mille ans en Chine. Ces prémisses de l'agriculture coïncident avec la sédentarisation de quelques populations. Ce qui a eu pour conséquence, d'une part, la constitution de villages et de villes, et d'autre part, le développement de pratiques agricoles destinées à nourrir la cité, l'ensemble constituant alors les premières véritables civilisations. Toutes les sédentarisation ont eu lieu en bordure de rivières, de fleuves ou de lacs.

En créant l'agriculture, les humains sont passés de la cueillette à la récolte nourricière. Or toute récolte est, *de facto*, un transfert d'éléments nutritifs depuis la terre, cet horizon supérieur des sols exploités par les racines, jusqu'aux récoltes, puis vers les humains consommateurs de ces récoltes. La répétition, en un lieu donné, de récoltes sans restitutions des éléments

nutritifs a pour conséquence mécanique et inéluctable une diminution de la fertilité du milieu se traduisant par une diminution des rendements : à travail égal, on récolte moins. Une situation qui n'est pas durable... L'entretien de la fertilité initiale des terres, indispensable à la constance des rendements, impose donc de restituer à la terre cultivée ce que nous lui prélevons à chaque récolte.

Quelque sept à huit mille ans plus tard, d'autres civilisations anciennes, considérées comme très prospères et pour lesquelles l'eau reste omniprésente, se sont développées sur la planète. On peut citer celle qui s'est épanouie depuis l'âge de bronze vers - 1 800 avant J.-C. aux environs d'Angkor au bord du lac Tonlé Sap, ainsi que celles qui se sont épanouies au long des siècles sur les bords du Nil et se sont traduites par la construction d'environ 100 pyramides de différentes tailles en l'espace de vingt ans, vers - 2560 avant J.-C.

Ainsi, les sédiments, avec la complicité continue et indispensable des agriculteurs, ont pu nourrir nos grands anciens, tout en entretenant la fertilité de leur terre. Aujourd'hui, ces pratiques ancestrales et éprouvées sont-elles toujours possibles ? La population planétaire a crû. Elle s'est concentrée dans les zones plates, les plus faciles à habiter, qui se trouvent au bord des eaux. Mais, en se protégeant des crues, l'homme a supprimé les possibilités de dépôt de sédiments sur les bords des fleuves. Il a donc fallu imaginer d'autres méthodes pour entretenir la fertilité des terres. Cet entretien se fait souvent au moyen de matières fertilisantes dont la production implique une forte consommation de matières premières non renouvelables à l'échelle humaine.

Agriculture et pyramides le long du Nil

Lorsque l'on sait que la pyramide de Kheops (la plus grande), à base carrée, de 440 coudées royales de côté, et de 147 m de haut pourrait avoir un poids d'environ 8 000 000 tonnes, une personne curieuse peut chercher à calculer la quantité de travail, estimée en kilojoules (kJ) ou en mégajoules (MJ), qu'il a fallu fournir, rien que pour élever cette pyramide. Sachant que la seule force de travail disponible était alors essentiellement humaine, quelle

.../...

.../...

fut la quantité de nourriture nécessaire pour réaliser un tel travail et la surface agricole indispensable pour la produire ? En considérant :

- que 1 kg de riz (ou de blé) contient environ 15 MJ ;
- qu'une culture de céréale pouvait au maximum atteindre un rendement de 600 kg/ha à cette époque, soit 9 000 MJ ;
- que pour simplement vivre un humain a besoin d'un apport journalier d'environ 8 000 kJ, que cet humain peut fournir dans ces conditions un travail estimé à 2 000 kJ et que, de fait, un homme qui travaille a besoin chaque jour de 10 000 kJ dont 2 000 sont consacrés à l'élévation de la pyramide ;
- des calculs faits à la grande louche, et bien des hypothèses discutables comme celle sur le nombre d'ouvriers présents (estimé ici à 30 000) ; l'élévation de la pyramide de Kheops aurait « consommé » en continu la nourriture produite sur quelque 10 000 hectares chaque année. Cela sans compter l'énergie indispensable à la fabrication des blocs et leur transport jusqu'au pied de l'édifice en construction. En faisant l'hypothèse que les cultures et récoltes avaient lieu de part et d'autre du Nil sur une largeur d'environ 1 km, la construction de Kheops aurait « consommé » pendant vingt ans la nourriture produite sur 50 km aux bords du Nil !

D'autres pyramides avaient déjà été construites dans cette zone. Des cultures avaient eu lieu auparavant. Sans restitution aux sols d'éléments nutritifs indispensables, il y a longtemps qu'elles auraient dû cesser de produire. Comment la fertilité de la terre, appréciée par la stabilité des rendements du riz, du blé et la présence de très nombreux animaux à chasser, était-elle entretenue sur les rives du Nil, ce qui ne semblait pas être le cas loin des zones humides ?

Tous les ans, entre juillet et septembre, les crues du Nil envahissaient les plaines proches, sans inonder les cités que les citoyens avaient bâties sur les hauteurs. À la décrue, en octobre, des sédiments, les limons noirs arrachés aux terres sur les 3 000 ou 4 000 km de parcours du fleuve, se déposaient. Les agriculteurs les enfouissaient le plus rapidement possible par un léger passage de houe. Puis ils semailent leurs céréales, qu'ils récoltaient en juin. Ces sédiments contenaient tous les éléments nutritifs nécessaires à la croissance des cultures pour l'année suivante, particulièrement du potassium, indispensable à la synthèse des amidons, du calcium et du phosphore présents dans les minéraux, et de l'azote véhiculé par les résidus organiques arrachés à la végétation du plateau éthiopien.

Et quand il n'y a plus de crues ni d'alluvions ?

Les crues périodiques répandaient dans la plaine du Nil les éléments nutritifs arrachés à un bassin-versant couvrant une bonne partie des hautes régions de l'Afrique. La construction du barrage d'Assouan dans les années 1960 a mis fin à ces crues.

Dans les années 2000, une série d'études a fait l'analyse du changement des cycles biogéochimiques qui s'est ensuivi. L'achat de fertilisants chimiques par les agriculteurs égyptiens a été multiplié par 5 en quarante ans : l'ancienne fertilité a donc été remplacée par une fertilisation d'origine industrielle. Dans la même période, la production de poissons a diminué partout en Méditerranée, sauf... dans le sud-est du bassin, au large de l'Égypte, où les prises ont été multipliées par 5 ! Les études scientifiques montrent ainsi un transfert de fertilité, notamment de phosphore et d'azote, qui bénéficiait autrefois à l'agriculture et maintenant à la pêche. Cependant, les éléments nutritifs qui arrivent à la mer sont non seulement issus des pertes de cette nouvelle fertilisation mais aussi des effluents d'une des plus grandes mégapoles du monde.

43. À quels sols doit-on les « greniers à blé » ?

Les alluvions fertiles des fleuves du Moyen-Orient ont été des berceaux de l'agriculture, car les crues y ont apporté les argiles et les éléments nutritifs arrachés aux montagnes en amont. Mais plusieurs régions situées plus au nord, en Europe et en Asie puis en Amérique, sont devenues dans le dernier millénaire parmi les plus productives du monde. Ainsi la Beauce, région qui occupe une grande partie sud-ouest du bassin parisien, est-elle surnommée le « grenier à blé » de la France. En plus d'un climat humide et frais favorable au blé tendre, c'est surtout à son sol que la Beauce doit sa fertilité.

Cette région est couverte d'un dépôt que l'on appelle loess ou limon éolien (voir question 73). Il est fait des minéraux que les grands glaciers des périodes glaciaires ont rabotés aux montagnes et moulus en une poudre fine. Elle s'est d'abord déposée dans les vallées, puis les vents de tempête l'ont emportée pour la redéposer plus loin, dans des zones dites périglaciaires. Les limons de l'ouest de l'Europe viennent principalement de la vallée du fleuve Manche, qui n'était pas remplie par la mer à l'époque, il y a vingt mille ans. Le limon possède des propriétés qui contribuent à la

fertilité des sols. Il offre une très grande réserve utile en eau. Les grains, d'un diamètre moyen de 20 μm environ, ménagent entre eux des pores de quelques micromètres, suffisamment fins pour que l'eau, retenue par capillarité, ne s'écoule pas, mais aussi suffisamment gros pour que les plantes puissent l'extraire par succion. Tout cela en gardant une structure qui permet au sol de rester aéré.

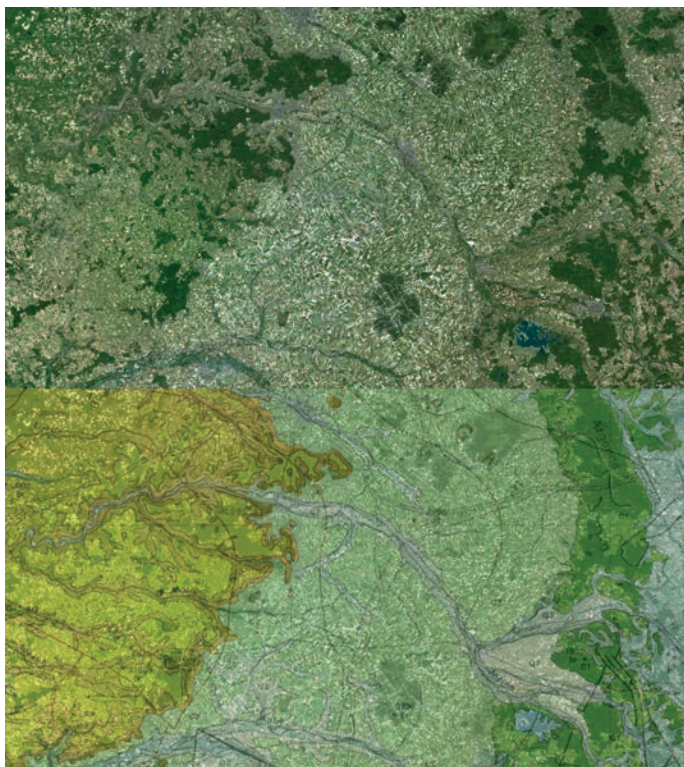
Un mètre d'épaisseur contient ainsi une réserve utile de plus de 200 litres par mètre carré, ce qui permettait de passer une année sèche en gardant pour l'été suivant les pluies de l'automne et de l'hiver. Le sol est relativement meuble et facile à travailler. Il contient une dizaine de pourcents d'argiles, qui retiennent les éléments nutritifs, les matières organiques et confèrent au sol une bonne fertilité chimique. Enfin, le loess contient, sinon du carbonate de calcium en profondeur, au moins une réserve importante de calcium, qui retarde son acidification.

Ainsi, les zones de loess sont devenues de riches régions agricoles en France, Belgique, Allemagne, Hongrie, Roumanie, Ukraine et Russie, et plus encore avec la mécanisation dans la deuxième moitié du XIX^e siècle. Le bassin du Huang He, en Chine contient les plus importants dépôts de loess du monde. Les sols sur loess restent cependant fragiles. Lorsqu'ils ne reçoivent pas assez de matière organique ou qu'ils sont labourés trop profondément, leur surface se désagrège et subit un phénomène que l'on dénomme battance, voire des érosions hydrique et éolienne. Ce processus touche par exemple une bonne partie du bassin du fleuve Jaune en Chine ou, à un moindre degré, le nord-ouest du bassin parisien.

Quand la Champagne pouilleuse devient un grenier de la France

La Champagne crayeuse, qui s'étend sur l'est de la Marne et le nord de l'Aube, était dénommée autrefois « Champagne pouilleuse ». C'était alors une région particulièrement pauvre, peu habitée et couverte d'une sorte de lande appelée savart, peu productive, comptant surtout des espèces xérophiles et abritant quelques camps militaires. Elle est maintenant devenue une région agricole parmi les plus productives du monde.

.../...



*À l'image satellite de la Champagne (en haut)
on a superposé les couleurs de la carte géologique (en bas).
La zone centrale des très grandes parcelles agricoles correspond à la zone de craie du Crétacé
supérieur (en vert clair) et se distingue des parcelles plus petits et variés sur les terrains
oligocènes (en jaune) ou des forêts sur les sols argileux de l'Argonne (en vert foncé).*

Ce territoire est aujourd'hui constitué de grandes parcelles agricoles, atteignant couramment la centaine d'hectares, visibles sur une image satellite d'1 m × 1 m de la France, et de fort peu de villages. Par quel miracle un tel changement a-t-il pu avoir lieu ? En fait, les propriétés chimiques de la craie étaient à l'origine de la stérilité de ces terres. Cette roche est composée quasi exclusivement de carbonate de calcium fin facilement solubilisable. En agronomie, on parle de calcaire actif. Ce dernier rend les solutions du sol alcalines (pH 8,3) et très riches en calcium. Ces deux propriétés contribuent à insolubiliser de nombreux éléments minéraux nutritifs, au premier plan

.../...

desquels le phosphore, le fer et d'autres oligoéléments, d'où une carence en ces éléments. Ils ne sont pas mobilisables par la végétation, qui absorbe par ses racines leurs formes solubles. La richesse en calcium crée même chez certaines espèces végétales une perception de sécheresse. Les sols crayeux étaient donc peu fertiles.

Dès que les agronomes ont préconisé des engrais contenant des formes facilement solubles de phosphore et de fer, le sol s'est avéré particulièrement fertile. La craie est facile à travailler car c'est une roche tendre pour les outils agraires. Surtout, elle a la particularité de présenter une porosité fine et continue qui permet à l'eau de remonter naturellement par capillarité depuis plus de 15 mètres de profondeur, ce qui prévient la région de toute sécheresse. Depuis les années 1950, elle est donc dédiée à l'agriculture intensive. On y voit beaucoup de luzerne et de betterave.

Sur le site Géoportail de l'IGN, vous pouvez superposer une image satellite et une carte géologique, vous pourrez voir la coïncidence des grandes parcelles et de la faible densité de villages avec la craie du Crétacé supérieur. Si l'épopée avait lieu de nos jours, on y aurait sûrement préservé de plus larges îlots de biodiversité.

44. Où se trouve le sol le plus riche du monde ?

Le *Petit Robert* nous apprend que l'adjectif « riche » possède plusieurs sens : (1) « qui a de la fortune, qui possède des biens » ; (2) « qui contient de nombreux éléments ou des éléments importants en abondance » ; (3) qu'un sol riche est « un sol fertile ».

Si nous nous en tenons à l'acception de la fertilité, nous concluons que les sols les plus riches du monde sont en jaune pâle sur la carte suivante, qui présente les capacités et limitations des sols à produire avec de faibles niveaux d'intrants. Ces sols en jaune pâle sont caractérisés par l'absence de rétention d'éléments chimiques, de salinité et de propriétés physiques défavorables. Il s'agit surtout de sols aux latitudes moyennes, essentiellement dans l'hémisphère Nord. Les plus riches de tous, peu visibles sur la carte, sont peut-être ceux développés sur les cendres basaltiques récentes de quelques îles volcaniques tropicales.

Pendant, dès que l'eau est présente et que la pauvreté en éléments chimiques peut être levée par la fertilisation, alors tous les sols en orangé,

sur la même carte, peuvent devenir riches. Il s'agit de surfaces énormes, principalement en Afrique, Amérique du Sud et Australie. On voit là l'énorme enjeu de l'accaparement des terres par différents investisseurs... qui a explosé depuis le début du xxi^{e} siècle.

Ces constats donnent l'occasion d'analyser ce que peut être, dans l'imaginaire collectif, un sol fertile. C'est un sol qui permet d'atteindre les récoltes escomptées. Mais les rendements obtenus actuellement en Ukraine par certains investisseurs, environ 4 t de céréales/ha, semblent indiquer que les terres sont beaucoup moins fertiles que des rêves un peu fous l'auraient laissé croire. Ces sols sont cultivés avec pour unique objectif, commun à ces investisseurs financiers : récolter le maximum de blé, avec l'investissement le plus faible possible. L'investisseur devient riche, très riche et parfois immensément riche, sans se préoccuper le moins du monde de la durabilité de la productivité des terres. Car, pour être et rester fertile, un sol doit être entretenu par des pratiques agronomiques (entretien physique, chimique et biologique) raisonnées sur le long terme (des dizaines d'années).

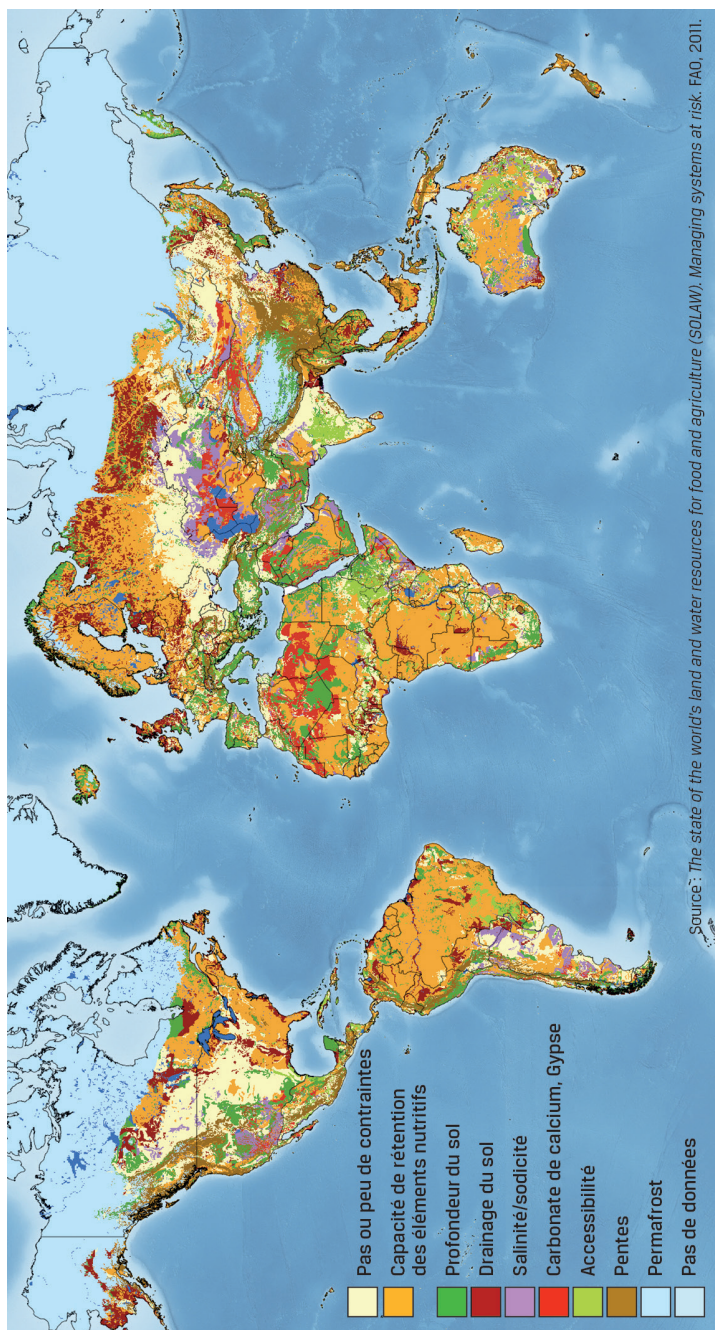
Les pratiques actuelles de nombreux investisseurs conduisent à une dégradation nette de la fertilité. De plus, l'appropriation (ou la location à très longue durée) par des investisseurs « internationaux » pose des problèmes sociaux énormes, pouvant aller jusqu'au découplage des notions d'État-nation et d'État-territoire. Cette tendance présente aussi des risques environnementaux majeurs (érosion, pollution des eaux...).

Question complémentaire : sait-on transformer un sol pauvre en sol riche ? Oui, mais un sol est essentiellement riche de promesses qui ne peuvent se transformer en richesses terrestres mesurables que par des efforts et du travail des hommes, qui doivent cultiver et entretenir la richesse potentielle.

45. Le maïs peut-il pousser n'importe où ?

Aujourd'hui, le maïs est cultivé dans environ 150 pays. Les États-Unis, la Chine et le Brésil assurent à eux seuls près de la moitié de la production mondiale. Sur les 1 000 millions de tonnes produites bon an mal an dans le monde, les deux tiers sont destinés à l'alimentation animale. Le tiers restant permet de nourrir les hommes, essentiellement en Afrique subsaharienne et en Amérique centrale et du Sud.

On trouve du maïs jusqu'à 3 000 mètres d'altitude en Amérique du Sud et en Asie. Il a gagné les champs entre les 50^{es} degrés de latitude nord et sud. Cette répartition géographique montre que les exigences du maïs en



Contraintes dominantes des sols et des terres pour une agriculture à faibles intrants.

matière de climat et de nature et qualité des sols sont assez peu contraignantes. Il devance désormais le blé et le riz en tonnage produit.

Dans l'inconscient collectif, il est l'un des symboles majeurs de l'agriculture intensive. Il fait l'objet de critiques permanentes portées par de nombreux défenseurs de la nature au motif que sa culture consommerait trop d'eau, polluerait les nappes et serait d'abord destinée à l'alimentation des animaux, devenus nos grands pourvoyeurs de protéines.

Petite histoire du maïs

Il y a quelque neuf mille ans, la téosinte, graminée dont l'épi mesurait de 2 à 3 cm et contenait 6 à 8 graines, abondait au bord du fleuve Balsas, sous climat tropical, à la limite de l'Amérique du Nord et de l'Amérique centrale. Jetant les bases d'une génétique empirique, les habitants du sud-ouest mexicain ont certainement effectué, sans le savoir, de la sélection massale, une opération qui consiste à conserver les graines des plantes les plus vigoureuses pour les ressemer l'année suivante. Aidés par l'apparition de mutants favorables, les agriculteurs ont disposé, deux mille ans plus tard, d'épis mesurant 7 à 8 cm. À la naissance de Jésus-Christ, l'épi atteignait 10 cm. La téosinte est ainsi devenue peu à peu le maïs (*Zea mays* L.) que l'on connaît. À partir de 1910, les généticiens du maïs, appliquant les lois découvertes par Mendel, s'en sont donné à cœur joie pour créer les multiples variétés, lignées et hybrides, avec des épis atteignant 20 cm. Un siècle de génie humain a suffi à modifier le rendement de cette culture autant, voire un peu plus, que les 90 siècles précédents !

Les agriculteurs considèrent le maïs comme une plante améliorante dans la mesure où sa culture conduit à supprimer tous les adventices. Il possède un système racinaire à la fois superficiel et profond qui lui donne un avantage significatif par rapport aux autres céréales.

Le maïs se développe aussi bien sur des sols basiques ou neutres qu'acides. Dans ces derniers, très fréquents sous climats tropicaux, on trouve de l'aluminium ionique, toxique pour beaucoup de plantes cultivées. La résistance du maïs à la toxicité aluminique se révèle bien supérieure à celle du blé ou du riz. Cette propriété lui confère un potentiel d'extension planétaire bien supérieur aux deux autres céréales.

.../...

.../...

Sa principale exigence climatique est la température. Le maïs se cultive en effet l'été car sa graine, pour pouvoir germer et se développer, doit trouver une température au-dessus de 10 °C. La plantule ne supporte pas le moindre gel et la floraison n'a lieu que si la température dépasse 18 °C. La plante n'arrive à maturité que si elle a reçu une certaine quantité de chaleur, appelée par les techniciens du maïs « somme de température », que les généticiens ont su considérablement modifier pour permettre d'étendre son aire vers le nord.

Sa dépendance à l'eau, pointée avec insistance par ses opposants, mérite réflexion avant critique. Les rendements élevés observés dans les pays à l'agronomie développée impliquent une consommation d'eau importante. Mais il faut rappeler que le maïs est, comme la canne à sucre et le sorgho, une graminée tropicale. Son mode de photosynthèse (dit « en C4 »), est plus efficace que celui des graminées tempérées (dites « en C3 ») et de la majorité des autres plantes cultivées. Ce processus métabolique fait que le maïs consomme au final 30 % d'eau en moins que le blé ou le riz pour produire la même quantité de matière sèche.

Le sol n'est donc pas si contraignant pour le maïs, mais on peut s'interroger sur l'effet du maïs sur le sol. En Europe, il s'agit d'une culture de printemps : le sol est souvent nu, sans végétation, pendant une longue période de novembre à avril. Cela a deux conséquences : une tendance à la minéralisation des matières organiques sans renouvellement à cette période et un risque d'impact négatif des intempéries sur les propriétés physiques du sol, pouvant aller jusqu'à la battance et l'érosion. De plus, les conditions sont alors optimales pour le lessivage de l'azote vers les nappes. La monoculture de maïs n'est donc pas très favorable aux matières organiques, à la préservation de la fertilité physique des sols, ni à la qualité de l'eau. C'est bien pire encore si la monoculture est conduite comme fourrage, une technique où l'on récolte la plante entière avant maturité pour nourrir les animaux en ensilage ou en vert : dans ce cas, il n'y a aucune restitution au sol de pailles ni de feuilles et le bilan organique du sol est vertigineusement à la baisse. C'est pourquoi de nombreux agriculteurs dans le monde combinent la culture du maïs avec du semis sous couvert végétal ou des cultures intermédiaires.

En conclusion, le maïs ne peut pas vraiment pousser partout, même s'il est globalement peu exigeant. Sa dépendance à la chaleur, probable mémoire génétique de lointaines origines tropicales humides, est certainement la contrainte majeure pour de nouvelles extensions planétaires.

46. Depuis quand se pratique la rotation de cultures ?

En 1840, Jean-Jules Bodin, agronome très pragmatique, indiquait que l'assolement était « l'art de faire alterner les cultures sur un même sol, pour en tirer constamment le plus grand produit aux moindres frais possibles ». Il classait ainsi l'agriculture au rang d'art et non de science. En 1862, un autre agronome, Gustave Heuzé écrivait : « les circonstances agricoles et économiques font les assolements ». Pour le paraphraser, il est possible d'affirmer que les circonstances économiques, induites par quelques progrès de connaissances concernant la nutrition des cultures et leur protection, progrès dont certains contestent l'intérêt écologique, ont torpillé les assolements et rotations des cultures.

Le principe de la rotation des cultures se perd dans la nuit des temps. Il s'est imposé dès la période où l'homme s'est fixé, cessant d'être exclusivement cueilleur et chasseur pour survivre. C'était il y a quelque 12 000 ans, en Mésopotamie (l'actuel Irak), que l'homme est devenu agriculteur en jetant quelques semences d'aegilops, la céréale ancêtre du blé, sur une parcelle qu'il avait un peu défriché. Cet agriculteur primitif a constaté, d'une part que le rendement d'une culture donnée sur une parcelle diminuait d'année en année lorsqu'elle était systématiquement répétée et, d'autre part, que la jachère, le « repos de la terre », par analogie avec celui des humains, permettait de retrouver les rendements initiaux : le concept de rotation des cultures sur une parcelle donnée était né. Ces observations anciennes nous autorisent à affirmer que nos ancêtres agriculteurs furent les premiers écologistes, puisqu'ils avaient compris le concept de niche écologique vivante et évolutive. Rappelons qu'à cette époque on ne récoltait en moyenne que deux graines pour une semée. Que d'évolutions depuis cette période !

La littérature ancienne grecque, avec Xénophon, ou latine avec Virgile, Pline, Théophraste, César et bien d'autres, regorge de commentaires sur cette pratique où l'on alternait céréale et jachère, à savoir l'assolement biennal. Ce sont les Romains qui semblent avoir pris conscience les premiers qu'il fallait aussi s'occuper du bétail et que la jachère pouvait être remplacée par des cultures de fèves et/ou de navets. Ainsi, on est passé de l'assolement biennal à l'assolement triennal. Puis on a vu apparaître, avec la multiplication des cultures industrielles, des assolements quadriennaux généralement très intensifs, quinquennaux, et encore, avec la nécessité d'exploiter des terres peu productives, des assolements sexennaux ou octonnaux dans lesquels des légumineuses du genre minette (*Medicago lupulina*) étaient semées avec le blé.

Un exemple de ce que furent assolement et rotation quadriennaux

Année	Sole 1	Sole 2	Sole 3	Sole 4
An 1	Plante sarclée (betterave)	Céréale de printemps	Légumineuse	Blé ou colza
An 2	Céréale de printemps	Légumineuse	Blé ou colza	Plante sarclée (betterave)
An 3	Légumineuse	Blé ou colza	Plante sarclée Betterave	Céréale de printemps
An 4	Blé ou colza	Plante sarclée (betterave)	Céréale de printemps	Légumineuse

Ne pas confondre rotation des cultures et assolement

La rotation des cultures est l'ordre de succession des cultures sur une même parcelle, ou sole. Ce qui impose, au sein d'une exploitation agricole, de disposer de plusieurs soles pour pouvoir produire, une année donnée, toutes les récoltes nécessaires tant pour la vente et la consommation des exploitants que pour les animaux d'exploitation agricole autrefois utilisés.

Le partage des terres, au sein d'une exploitation, en soles portant chacune une culture différente, porte le nom d'assolement. Ces expressions sont devenues très rares aujourd'hui avec l'évolution des pratiques agricoles.

47. L'alternance des cultures est-elle nécessaire à la terre ?

Sans pratiques particulières, les plantes réussissent mal sur un terrain qui vient de porter des végétaux de la même espèce, du même genre ou de la même famille. Elles sont, à l'évidence, messagères d'informations ; pour les comprendre, sachons les observer !

Ayant constaté qu'il est toujours possible de répéter l'alternance des cultures sur une parcelle, on a avancé de nombreuses théories pour l'expliquer et la justifier. Certains ont émis l'hypothèse anthropomorphique qu'un certain repos, représenté par la jachère, serait nécessaire à la terre pour qu'elle se remette à produire. Mais, au contraire de l'explication qui suit, cela n'a pas été avéré.

Rappelons que toute récolte a pour conséquence une exportation d'éléments minéraux nutritifs hors des parcelles ; c'est pourquoi toute culture récoltée doit être considérée comme épuisante pour la terre. Toutes les sociétés qui ont pratiqué le *soil mining* ont vu les rendements des cultures s'étioler. Il est donc nécessaire de trouver des méthodes pour rapporter tout ou partie des exportations dues aux récoltes.

Les anciens agronomes ont scindé le monde végétal cultivé en plantes très épuisantes comme le blé, le colza et la betterave sucrière, et en plantes épuisantes, tels l'avoine et le sarrasin. Mais ils ont aussi indiqué l'existence de plantes améliorantes ou fertilisantes. Il s'agit de la luzerne, du trèfle, de la minette, du sainfoin, voire, dans les sols dont la fertilité est très limitée, de l'ajonc ; toutes ces légumineuses accroissent la teneur de l'azote dans les terres par fixation de l'azote de l'atmosphère : un sacré transfert ! Sans le savoir – car ils ne connaissaient pas encore l'azote, pas plus les nitrates que l'ammonium –, ils avaient compris qu'une substance (un « suc », selon l'expression d'alors) était le premier des carburants indispensables à la croissance des plantes. Mais ces plantes sont d'autant plus efficaces que la fertilité des terres est initialement élevée et propice au développement de cultures. Cela revient à faire le constat que les riches s'enrichissent plus vite que les pauvres, creusant les écarts... Dans tous les cas, il importait de placer dans la rotation une légumineuse.

C'est à l'abbé François Rozier que l'on doit d'avoir formalisé, en 1775, une observation fondamentale pour l'agronomie : « Les plantes puisent leur nourriture dans le sol à des profondeurs différentes suivant la manière de leurs racines. » De plus, les interactions biologiques entre organismes justifient la rotation et non la monoculture : relations plante-plante, plante-microorganisme, plante-ravageur, et entre organismes du sol. Les mauvaises herbes peuvent prendre le dessus sur une espèce cultivée et, d'année en année, dominer sa culture. L'introduction d'une plante qui prendra le dessus sur la mauvaise herbe rompra le cercle. Il en est de même des multiples parasites, insectes ou pathogènes, champignons ou bactéries, qui ont une partie de leur cycle dans le sol ou les résidus de culture et une partie dans la plante.

Le couple assolement-rotation diversifie aussi le paysage, ce qui peut favoriser les organismes utiles comme les pollinisateurs ou les prédateurs des ravageurs. En généralisant, on peut dire que la biodiversité générée par la rotation constitue un tampon contre l'émergence des maladies des cultures.

Les choix de l'agriculture au fil des temps

Les agriculteurs d'avant-hier, pour tendre vers les cultures les plus rémunératrices possibles dans le contexte économique du moment, devaient faire succéder :

- une plante « nettoyante » (plante sarclée telle la betterave) à une plante « salissante », comme le blé, en remarquant que l'aspect nettoyant pouvait être le fait des techniques culturales utilisées (sarclage) ou une propriété intrinsèque à la culture (larges feuilles) ;
- une plante améliorante (légumineuse) à une plante épuisante (blé), pour réinjecter dans l'agroécosystème l'azote fixé symbiotiquement par la légumineuse ;
- une plante à racine pivotante à une plante à racine traçante, pour que l'ensemble de l'horizon labouré soit exploité par des racines ;
- une plante réclamant de l'azote (blé) à une plante davantage intéressée par la potasse et le calcium (trèfle) afin d'équilibrer les éléments nutritifs dans la terre ;
- une plante attaquée par un insecte ou un champignon par une plante dont les ennemis sont différents pour laisser la maladie actuelle « s'éteindre ».

Les agriculteurs d'hier ont eu tendance à s'affranchir de la rotation et utilisaient :

- des herbicides pour « nettoyer » les cultures, évitant la pullulation des mauvaises herbes qui entrent en compétition avec la culture pour l'eau et parfois la lumière ;
- des matières fertilisantes minérales en quantité supérieure aux besoins des cultures envisagées pour réinjecter de l'azote, favoriser la croissance des racines et rééquilibrer les éléments nutritifs de la terre ;
- des phytopharmaceutiques, plus connus sous leur pseudo de « pesticides », pour inhiber le développement des maladies et ravageurs.

Les agriculteurs d'aujourd'hui, face au besoin de réduire l'utilisation des pesticides et de mieux contrôler les flux d'azote pour éviter les contaminations du milieu, le tout sans perte de revenu, doivent réinventer de nouvelles rotations, à la fois efficaces et économes en énergie comme en travail. C'est un joli défi.

Au-delà de la rotation, les agriculteurs peuvent même utiliser des cultures intercalaires (entre deux cultures) ou associées (deux productions en même temps sur la même parcelle), et aménager l'ensemble du paysage et les espaces entre les parcelles pour favoriser la biodiversité.

48. Pourquoi cultiver plusieurs espèces en même temps ?

De nombreux systèmes de culture font appel à la synergie ou à la complémentarité entre plusieurs plantes pour améliorer la productivité, réduire les impacts environnementaux négatifs, ou les deux. Il peut s'agir de méthodes anciennes, mais l'innovation agroécologique en produit sans arrêt pour mieux exploiter les ressources minérales, limiter les intrants et les pertes (en particulier azotés), mieux combattre les mauvaises herbes, mieux utiliser l'espace, mieux couvrir le sol, mieux protéger les cultures contre les bioagresseurs (en profitant de propriétés, répulsives ou insecticides par exemple, d'un des partenaires), limiter l'érosion ou la contamination des eaux, augmenter l'apport de matière organique au sol. Les systèmes en question sont innombrables, mais on peut distinguer plusieurs grandes catégories.

- *Les cultures associées* ont un succès croissant. Il s'agit de la culture simultanée de deux espèces ou plus sur la même surface. Maîtrisée depuis longtemps pour les fourrages, les potagers ou les vergers, la technique avait été abandonnée en grande culture, mais revient, en particulier avec les associations céréales-légumineuses. Les produits sont dans la mesure du possible récoltés en même temps ; on n'en est pas encore à cultiver du couscous complet (blé dur + pois chiche + courgettes), ou des petits-pois-carottes prêts à être mis en boîte, mais ça ne saurait tarder.

- *L'agroforesterie*, très répandue sous les tropiques, est un cas particulier où une des cultures est ligneuse.

- *L'enherbement*, de plus en plus pratiqué dans les vergers et les vignes, est une variante où l'herbe peut ou non être récoltée.

- *Les cultures dérobées* s'intercalent entre deux cultures principales, permettant deux récoltes dans un même cycle annuel.

- *Les cultures intermédiaires* s'intercalent aussi entre les récoltes. Cependant, elles ne sont pas récoltées, mais détruites ou enfouies dans le sol. Elles sont destinées en particulier à capter les nitrates, améliorer le sol, augmenter le carbone du sol, éviter l'installation de mauvaises herbes.

Enfin, on a pris conscience, à la fin du siècle dernier, que tolérer une petite population de mauvaises herbes permet de réduire considérablement à la fois les coûts de production et les contaminations par les herbicides. On savait que la monoculture présentait de nombreux inconvénients ; la culture pure, elle aussi, tend à perdre son hégémonie.

49. Les vers de terre ont-ils déserté nos champs ?

On dénombre plusieurs milliers d'espèces de vers de terre sur notre planète. Ce sont des invertébrés annélides, un groupe phylogénétiquement proche de celui des mollusques. Le terme signifie au départ que leur corps est fait d'une succession d'anneaux. Leur plus grand représentant, *Megascolides australis*, peut mesurer 2 mètres de long. Mais combien sont-ils réellement dans l'horizon supérieur des terres de nos champs ? Un nombre très variable selon les terres, compris entre 10 et 1 000/m². En fonction des espèces, leur taille individuelle varie entre quelques centimètres et... quelques mètres. On pourrait évaluer raisonnablement leur masse, pour les 50 premiers centimètres de terre, entre 10 et 170 g/m², soit de 100 kg à 1,7 t/ha, soit l'équivalent protéinique compris entre 1 jeune mouton et 2 bœufs charollais. Cette masse représente en moyenne 0,2 % de la terre dans laquelle les vers de terre œuvrent.

Ils vivent à l'aise dans des terres calcaires, neutres, ou peu acides, ce qui contribue à expliquer leur faible abondance dans les zones boréales et tropicales, où les sols sont majoritairement acides. Ils respirent à travers leur peau, craignent donc l'excès d'eau, et se complaisent dans une humidité et une température moyenne. En été lorsqu'il fait sec et en hiver s'il fait froid, ils entrent en léthargie, se conservent sous forme d'embryons dans des cocons, ou s'enfoncent en profondeur. Et se réveillent dès que des conditions écologiques favorables se remettent en place. Ils se nourrissent essentiellement de débris végétaux mais ne s'attaquent jamais spécifiquement aux racines vivantes : ce ne sont pas des ennemis des cultures. Mais ils régaleront les oiseaux, carabes, taupes et sangliers.

Il y a trois principales catégories écologiques de vers. Ceux qui consomment les litières au-dessus du sol sont dits épigés ; le genre *Eisenia*, élevé pour les vermicomposts, fait partie de ceux-ci. Ceux qui ne sortent jamais du sol, dits endogés, ne sont connus que ceux qui creusent la terre. Et puis il y a ceux qui font des allers-retours entre la profondeur et la surface, où ils déposent des turricules ; parmi eux, on compte la vedette, *Lombricus terrestris*.

On peut dire que les lombrics « mangent » le chemin qu'ils tracent dans la terre. Les galeries qu'ils creusent favorisent l'indispensable circulation de l'eau et des gaz dans les terres, et pourront ultérieurement être utilisées par les racines. Selon les espèces, ils ingèrent chaque jour 2 à 30 fois leur propre poids de terre. Ils rejettent ainsi de très grandes quantités d'un mélange

de terre et de matières organiques, partiellement digérées par des enzymes contenues dans leur tube digestif et émises, pour partie, par les microorganismes qu'ils hébergent dans leur tractus intestinal. Les turricules, bien connus de qui sait admirer les vertes pelouses, permettent de quantifier leur présence, voire leur activité. La fertilité, au sens agricole, de ces turricules est nettement supérieure à celle des terres dont ils sont issus, en raison de la minéralisation des matières organiques ingérées et pour partie digérées. On estime que la biodisponibilité de l'azote et du phosphore dans les turricules est 2 à 3 fois supérieure à celle des terres dont ils proviennent.

Consommant des débris organiques, principalement végétaux, ils sont bien plus nombreux dans les sols où les teneurs en matières organiques sont les plus importantes : en forêt mélangée, dans les prairies permanentes humides de fond de vallées et dans les zones où les humains leur fournissent les matières organiques en voie d'humification. Mais la vie est dure au lombric lorsque l'homme réduit son alimentation, perturbe son habitat, ou l'empoisonne.

- Dans les champs, la réduction des restitutions de matières organiques comme les fumiers, restreint sa source de nourriture. À ce titre, la récolte des pailles, en plein développement, pour en extraire des produits organiques ou de la chaleur, ne leur sera pas favorable. En milieu forestier, les lombrics apprécient modérément la composition des litières de certaines espèces, comme l'épicéa.

- Certaines pratiques agricoles, comme émietter la terre afin de favoriser la germination des semences, sont très destructrices de leurs habitats, donc réduisent la densité des lombrics.

- Les sels d'ammonium ne sont pas pour eux un régal. Or, sur la planète entière, la majorité des apports d'engrais azotés minéraux se fait sous forme ammoniacale. L'apport du lisier a les mêmes défauts.

- Certains pesticides, déjà connus pour leur rôle dans le déclin des abeilles, sont aussi toxiques pour les vers de terre. Il vient d'être établi clairement que les plus récents insecticides, largement répandus en agriculture depuis les années 1990, diminuent leur population. Il s'agit d'insecticides systémiques de la famille des néonicotinoïdes et des phénylpyrazoles, qui agissent en perturbant le système nerveux des insectes et d'autres animaux.

- Récemment, des plathelminthes de grande taille, prédateurs de lombrics, ont été identifiés dans différents départements français. Ces vers plats, importés accidentellement de Nouvelle-Zélande, d'Australie et

d'Asie du Sud-Est, pourraient menacer les populations de lombrics.

Il est toujours envisageable de recoloniser des champs abandonnés par les vers de terre. Mais, comme il est plus rapide de minéraliser la matière organique des sols que de l'accumuler, la reconstitution des populations lombriciennes sera toujours beaucoup plus lente que leur destruction.

Techniques de chasse

Comment la taupe, grosse et aveugle, poursuit-elle les lombrics dans le sol ? Sa technique s'apparente à celle du métro ramassant les voyageurs aux heures de pointe. La taupe établit un réseau permanent de tunnels et se poste à l'une des extrémités. Le ver, en creusant sa galerie, tombe dans le tunnel et en suit le plancher, jusqu'à ce que la taupe passe et l'avale. Une technique similaire est utilisée par les pêcheurs pour collecter leurs appâts. Sur les terrains de sport à l'herbe rase, on voit parfois courir des lumières, les nuits qui suivent des jours pluvieux. Les vers, attirés en surface par la pluie, débouchent à la surface et parcourent le gazon avant de retrouver un orifice favorable. Frontales allumées et seau à la main, des malins les récoltent par poignées.

50. Comment la luzerne et le trèfle peuvent-ils enrichir la terre ?

Dans les campagnes céréalières, on entend parfois un agriculteur commenter : « Ah, c'est un blé de luzerne ». Il s'agit de parcelles ayant porté de la luzerne pendant trois ou quatre ans, fréquemment cultivées sans apport d'engrais azoté. Les plantes qui ont succédé à cette culture semblent avoir de bons voire de meilleurs rendements que sur d'autres parcelles. La luzerne a été récoltée comme fourrage, le plus souvent vendu à l'extérieur de la ferme, les systèmes agricoles (polyculture-élevage) devenant rares. Avant de semer le blé d'hiver, les résidus, en particulier les racines, ont été enfouis en fin d'été. Le plus souvent, toute céréale poussant sur cette parcelle s'y trouve très bien !

Plusieurs mécanismes expliquent cet accroissement de fertilité apparente, qualifiée parfois d'enrichissement de la terre. Le premier mécanisme, qui n'est pas toujours le plus efficient, tient au fait que la luzerne est une légumineuse. Elle s'associe, au sein de nodosités présentes sur la racine de la plante, à des bactéries de la famille *Rhizobium* naturellement présentes dans les terres. Ces rhizobiacées puisent dans la luzerne, qui les

synthétise par photosynthèse, des molécules organiques nécessaires à leur fonctionnement métabolique. Nourris de ces sucres nutritifs, les rhizobiacées fixent l'azote gazeux de l'air, inutilisable par les plantes supérieures, et le transforment, grâce à l'enzyme nitrogénase, en ammonium, cation essentiel à la constitution des acides aminés, briques constitutives majeures des protéines. Tel est le mécanisme de fixation symbiotique de l'azote.

Les rhizobiacées rétrocèdent alors cet azote organique néoformé à la luzerne, qui peut ainsi assurer son développement sans besoin d'azote complémentaire. Il s'agit d'une association symbiotique hautement fonctionnelle, et de grande efficacité tant que l'agriculteur n'apporte pas d'engrais azotés minéraux. Ces rhizobiacées transforment ainsi annuellement entre 10 et 150 kg d'azote gazeux en azote organique par hectare qui, pour l'essentiel, sont utilisés par la luzerne pour assurer sa croissance. Au bout de trois à quatre ans, la luzerne aura fixé, en conditions idéales, environ 400 kg d'azote/ha. Près de 10 %, soit environ 40 kg d'azote, restent dans le sol avec les racines et les nodosités qui entrent dans le cycle agricole au moment du labour en fin d'été. L'essentiel de cet azote organique se transforme, sous l'influence d'autres bactéries, en ammonium, puis en nitrates, forme d'azote préférée par la majorité des plantes cultivées. C'est pourquoi il est raisonnable de déduire cette quantité des quantités prévisionnelles d'engrais azoté à appliquer pour atteindre le rendement optimal dans les conditions agropédoclimatiques locales. En considérant qu'un quintal de blé récolté contient en moyenne 2 kg d'azote, l'azote fourni par les résidus de luzerne enfouis procure un gain de récolte de l'ordre de 2 t de blé/ha. Si la culture de luzerne est enfouie en totalité, l'azote qu'elle contient peut suffire à produire un beau rendement de blé. Ce mécanisme influence donc positivement la fertilité chimique de la terre en y injectant de l'azote utilisable par les plantes. Une fois la première culture récoltée, l'effet positif s'estompe, puisque l'essentiel de l'azote minéral additionnel est prélevé dès la première culture.

Un second mécanisme, plus discret, participe également, mais pour une part variable selon les sols, à l'accroissement des rendements. Les racines de la luzerne descendent en effet profondément, très souvent à plus d'un mètre. Ce faisant, elles améliorent la structure du sol et favorisent la pénétration des racines de la culture qui suit. La luzerne contribue ainsi à accroître la fertilité physique de la terre. En outre, les racines remontent des profondeurs quelques éléments nutritifs, qui comme l'azote, enrichiront la surface. C'est ainsi que, au fil des siècles, se sont constituées, dans

les milieux naturels, toutes les fertilités : la fertilité chimique, la fertilité physique et la fertilité biologique liée, entre autres mécanismes, à la fixation symbiotique d'azote.



Les racines du soja forment des nodosités qui abritent une bactérie symbiotique du genre Brady-rhizobium. Celle-ci fixe le diazote de l'air N_2 et, grâce à l'enzyme nitrogénase, le réduit en azote ammoniacal NH_4^+ que la plante utilise comme élément nutritif.

La luzerne n'est pas la seule plante faisant des associations symbiotiques avec des microorganismes capables de transformer l'azote de l'air en azote ammoniacal. Toutes les plantes légumineuses savent le faire. Parmi elles, on peut citer le trèfle, mais aussi le sainfoin, les ajoncs, les genêts, les acacias. Le soja, le haricot, les petits pois, le niébé sous d'autres cieux, prennent une place particulière dans la mesure où leurs graines sont d'abord des aliments fournissant à l'homme l'essentiel des protéines qui lui sont indispensables. Celles-ci sont ainsi synthétisées à un coût énergétique très inférieur à ce que font nos animaux, qui représentent l'autre source de protéines pour les humains.

On a coutume de dire que les légumineuses enrichissent la terre. Pour leur rendre grâce, on pourrait ajouter que l'agriculteur qui cultive une terre ayant porté une légumineuse s'enrichira plus que celui qui n'aura pas pratiqué cette technique biologique.

51. Les tracteurs sont-ils trop lourds ?

Au printemps, au cours de ses promenades champêtres, le citadin peut apercevoir de longues saignées dans les champs, particulièrement dans les cultures de céréales. Ces traces illustrent le passage des agriculteurs qui ont

choisi, en début de végétation, de pratiquer des traitements phytopharmaceutiques, pour lutter soit contre des champignons parasites qui diminuent les récoltes et peuvent en altérer la qualité, soit contre les « mauvaises herbes » qui peuvent entrer en compétition avec les plantes de culture pour la lumière, l'eau et les éléments nutritifs disponibles. Ces cultivateurs estiment que le manque à récolter lié à l'écrasement des plantes par les roues de tracteurs est inférieur à celui qui aurait été provoqué par les attaques des bio-agresseurs et les « mauvaises herbes ».

Peut-on labourer sans tasser ? Certainement pas ! Le *Larousse agricole*, œuvre magistrale dans le domaine de l'agriculture après le *Théâtre d'agriculture et le mesnage des champs* d'Olivier de Serres, rappelle dans son édition de 1921, puis dans celle de 1952, qu'après avoir semé son blé, le cultivateur, pour bien récolter, doit « plomber la terre », c'est-à-dire passer le rouleau, pour que les constituants des terres et l'eau du sol entrent en contacts intimes avec la graine, dont la germination sera alors assurée dans les meilleures conditions. Mais qui trop en tasse, mal cultive et récolte. Une superficie de 33 millions d'ha serait actuellement concernée en Europe par le tassement excessif, soit 4 % des terres. On a pris conscience assez récemment que le problème touche aussi la forêt, du fait de la mécanisation du débardage.

Chacun sait intuitivement qu'une terre tassée est moins favorable qu'une terre bien meuble, peu tassée, à l'exploration racinaire par la végétation. Or tout tassement est la conséquence d'une pression exercée et tout tracteur exerce une pression sur le support où il progresse. C'est quoi, la pression ? Le poids divisé par la surface de sustentation ! La parade consiste à utiliser des pneus très larges ou bien le jumelage de roues. Mais, en fait, les conséquences d'une pression dépendent de l'état d'humidité de la terre. Nos anciens gardent en mémoire l'époque où les roues des charrettes creusaient d'énormes ornières et où les pieds des bovins ravageaient les prairies auprès des barrières. Car, en matière de tassement, les effets des tracteurs dans les champs de céréales sont bien peu de chose à côté des pieds des bovins.

En fait, c'est sur le registre à la fois du calendrier de passage, par rapport à l'humidité des terres, et de la répétition des passages, que l'agriculteur doit être très vigilant, bien plus que sur le poids du tracteur. D'ailleurs le poids de l'engin tracté exerce souvent plus de pression que le tracteur. Passer sur un sol sec ne pose aucun problème. Au-dessus d'un certain taux d'humidité, qu'on appelle d'ailleurs « limite de plasticité », le sol devient plastique comme la terre du potier et pourra prendre en masse. Passer sur

un sol trop humide tasse la terre et crée des « semelles » dans lesquelles les racines ne réussiront pas à pénétrer, pendant des années.

Au-delà d'un labour dans de plus saines conditions et de l'action lente et progressive des racines et des organismes fousseurs, le gel peut fragmenter de telles structures tassées. Mais, sur le climat, l'homme n'a aucune maîtrise immédiate.

52. Est-il vraiment nécessaire de labourer ?

Le labour est une pratique à la fois universelle et très ancienne, datant d'au moins cinq mille ans. Le retournement de la terre, qui doit être effectué dans des conditions physiques ni trop sèches ni trop humides, a en effet plusieurs conséquences très favorables : il permet de décompacter la terre afin que la racine ne rencontre qu'un milieu meuble favorable à son déplacement. Ce milieu décompacté permet de stocker l'eau en quantité plus importante qu'un milieu compacté. Cette eau stockée y circulera aussi plus aisément et ne stagnera pas, ce qui pourrait conduire localement à un manque d'oxygène ; les racines, comme les microorganismes qui l'entourent, formant la rhizosphère, ont un besoin absolu de respirer. Le labour rend le sol un peu plus homogène et permet d'enfouir, pour les répartir dans la zone qui sera explorée par les racines, les matières fertilisantes tels les engrais, les engrais verts et les amendements organiques et minéraux. Enfin, c'est un moyen mécanique efficace pour détruire nombre de « mauvaises herbes », concurrentes déloyales des cultures souhaitées ! C'est pourquoi le labour a été, et reste souvent, une pratique normale.

Néanmoins, les grosses mottes obtenues par le labour, séparées par de nombreux vides, ne sont pas le milieu le plus favorable pour assurer une germination optimale des semis. C'est ce qui avait conduit nos agriculteurs à utiliser des herbes pour briser les mottes et obtenir ainsi une structure plus grumeleuse. Mais le labour a pour conséquence immédiate la réduction de quantités des matières organiques en surface car il dilue ces dernières avec les matières minérales (d'autant plus que le labour est profond), puis favorise à long terme la biodégradation des matières organiques par les microorganismes. Or toute diminution des teneurs en matières organiques se traduit inéluctablement par la prise en masse des terres, les rendant moins propices à la progression des racines et à la circulation de l'eau, donc à des rendements optimaux. Nos ancêtres le savaient implicitement et, pour s'en prémunir, remettaient, après plusieurs années de culture, leurs champs en jachère pluriannuelle. Les racines qui s'y développaient avaient le temps

de se glisser au sein des mottes et les désagrégeaient, rendant la terre de nouveau plus meuble. Simultanément, les racines reconstituaient les stocks de matières organiques (75 % à 80 % des matières organiques rencontrées dans les terres proviennent des racines des cultures précédentes, ou de leurs excréments) et le cycle culture-jachère pouvait recommencer.

Les techniques culturales simplifiées

Les outils ont beaucoup évolué. Certains permettent désormais en un seul passage d'aérer la terre et de briser les mottes encore bien plus finement que la herse ne le faisait. Les surfaces de contact entre constituants organiques des terres, microorganismes et oxygène étant accrues, la vitesse de dégradation des matières organiques dans les sols croît. Les sols deviennent plus sensibles à l'érosion et à la compaction.

Inquiets de l'évolution des pratiques agricoles accélérant la consommation des constituants des matières organiques telluriques, des agronomes ont développé des techniques d'agriculture de conservation, essentiellement destinées à conserver cette matière organique pour assurer une physique du sol optimale. Toutes ces méthodes portent le nom de « techniques culturales simplifiées » (TCS). Elles ont de multiples variantes, mais toutes ont en commun de chercher, à la différence du labour qui retourne toute la terre sur son passage, à ne pas « agiter » la totalité de la zone explorée par les racines, protégeant de la dégradation au moins une fraction de la matière organique des terres. L'une d'entre elle, en plein développement, porte le nom de *strip till*. Cette technique consiste à n'ameublir que la ligne de semis sur une largeur de 5 à 10 cm, et à y déposer, dans le cas le plus élaboré, les engrais granulés PK, voire quelques oligoéléments nécessaires à la culture à venir, en dessous de la graine, le tout étant effectué en un seul passage, pour éviter trop de tassement des terres consécutif aux passages.

Ainsi, dans nombre de pays où les agriculteurs disposent d'outils très puissants et de l'énergie nécessaire à leur mise en œuvre, le labour avec retournement total des terres quitte lentement et discrètement nos campagnes.

Les techniques de travail simplifiées et de semis direct sous couvert végétal (SCV) sont adoptées de façon très contrastée entre l'Ancien Monde et le Nouveau Monde. Elles deviennent par exemple très populaires en Amérique du Sud. En effet, un enjeu vital de ces techniques est de prévenir le risque de perte du sol par dégradation physique ou érosion. Les nouvelles terres que les

.../...

.../...
 agricultures d'Amérique et d'Australie colonisent sur de vastes superficies, après défriche forestière par exemple, sont fragiles, de sorte qu'exploitées sans précautions, elles sont exposées à un fort risque de dégradation, risque encore accru sous les climats tropicaux.

53. Quels sont les impacts des haies végétales ?

Le mouvement de remembrement général des terres, qui a conduit à la destruction rapide des haies végétales en France, s'est développé après 1945. L'agriculture devait assurer la satisfaction des besoins alimentaires de tous les Français, avec une population agricole réduite. L'openfield de Beauce ne comporte pas de haies ; leur présence dans certains de nos paysages ruraux était-elle vraiment incompatible avec l'accroissement revendiqué des productions alimentaires ?

Une haie peut être définie comme une association continue, dans l'espace et le temps, d'arbustes et d'arbres, plus ou moins entretenue mais difficilement franchissable, située en limite de parcelle. Elle est souvent bordée par un fossé, un drain. Les haies ont diverses fonctions : frontière, enclos, production de bois et fruits, de services aux cultures qu'elles enclosent, et aux agriculteurs. Les haies résultent souvent de la réduction des boisements par l'emprise agricole. On peut connaître leur ancienneté en mesurant la diversité des ligneux qui les composent. Les haies récentes sont très homogènes, les haies pluriséculaires ont des compositions proches de celles des forêts avoisinantes.

Les haies ont été mises en place dans les sociétés où la possession individuelle de la terre s'est développée, et dans les sociétés qui associent cultures et élevages, que l'on doit impérativement séparer. Désormais, on rencontre les haies essentiellement, mais pas uniquement, dans les régions de bocage où le système agricole polyculture-élevage est la pratique dominante. La pointe du Cotentin en est notre meilleure illustration : la densité de haies dépasse 200 mètres linéaires par hectare. La basse vallée du Rhône, où le milieu naturel est marqué par le mistral, comporte nombre de haies servant essentiellement de brise-vent.

Les haies, dans les campagnes, sont le cadastre en vraie grandeur et limitent les procès entre voisins car, à la différence des bornes plantées, elles ne peuvent se déplacer ou être déplacées par « accident ». Mais cette

fonction de clôture portée par la haie a largement été détrônée, au cours du dernier siècle, d'abord par des fils de fer dits barbelés, peu mobiles, puis par ces clôtures électriques très facilement déplaçables.

Les services apportés par les haies ont été étudiés lorsque le remembrement a provoqué leur déclin numérique dans de multiples paysages ruraux. Elles peuvent avoir plusieurs impacts et fonctions :

- Influencer significativement et négativement les conditions de travail des agriculteurs. C'est même ce qui a le plus largement contribué à les perdre. D'une part, le remplacement progressif de la traction animale par des tracteurs de plus en plus puissants capables de tirer des outils de grande largeur et pouvant travailler ainsi 10 hectares, ou plus, par jour, requiert de supprimer massivement les haies. Sous cet angle, c'est la suppression des haies qui est utile. Leur maintien est ressenti comme un handicap. D'autre part, la surface occupée par une haie est une surface non cultivée, mais qu'il faut entretenir, et dont la rentabilité est difficilement mesurable.

- Contribuer à conserver les sols, physiquement et quantitativement, par limitation de l'érosion hydrique et/ou éolienne. Pour preuve, l'existence, entre parcelles, de ces chemins creux bordés de hauts talus surmontés de haies, signifiant ainsi l'accumulation, souvent au cours des siècles, de matières minérales et organiques au pied de la haie. Faut-il ajouter que, dans nombre de situations où les haies ont totalement été éliminées pour agrandir la taille des parcelles, lors d'épisodes pluvieux violents, on voit apparaître jusque dans les villages des torrents de boue dès que la pente des sols dépasse 2 à 3 %, c'est-à-dire que 3 à 4 t de terre quittent chaque hectare. Sans compter les transferts rapides de pesticides vers les émissaires ! Sous cet angle, les haies ont un bénéfice local (le champ qui ne perd pas de sol) et plus global (par limitation de transferts indésirables dans les eaux de surface).

- Assurer une fonction de production de bois de chauffe, de bois de construction, de pommes et de poires dans les régions de bocage, de fruits rouges. Cette combinaison de production des arbres et des champs est appréciée dans le contexte de l'agroforesterie.

- Contribuer à la régulation hydraulique des milieux cultivés. Les talus associés aux haies « cassent » les flux d'eau impétueux lors des épisodes de pluies violentes, et servent même « d'éponges », de réservoirs temporaires après les pluies violentes. Néanmoins, force est d'admettre que la haie consomme de l'eau au détriment des cultures les plus proches. Cette situation est particulièrement visible et ressentie pendant les périodes de sécheresse. C'est d'ailleurs dans de telles conditions que les méfaits de l'azote sont exacerbés. Le bilan

de cet effet « éponge » reste néanmoins à intégrer en positif dans les systèmes de cultures tant au plan local que global dans la limitation des crues.

- Assurer une régulation très locale du climat. Tel est le cas de la lutte contre les effets des vents comme le mistral en Provence. La présence des haies, plantées ou entretenues, réduit significativement l'évapotranspiration de toutes les cultures implantées sur une longueur équivalente à environ 10 fois la hauteur de la haie. Cet effet compense très largement la consommation d'eau par les haies aux dépens des cultures.

- Maintenir des équilibres interspécifiques. Les haies font partie, avec les lisières de bois et les bandes enherbées, des espaces naturels et semi-naturels dont on est actuellement en train de comprendre qu'ils ont un rôle très important dans la régulation des bio-agresseurs des cultures. Il s'agit donc d'entretenir la biodiversité dans certaines zones plus vastes que la parcelle, avec des effets dont certains peuvent être positifs et d'autres négatifs sur la productivité.

En Beauce, des agriculteurs ont implanté simultanément des haies et utilisé des techniques de travail du sol réduit dans leurs grands champs déserts pour... la chasse : le travail du sol favorise les vers de terre et les invertébrés du sol, lesquels nourrissent les oiseaux prédateurs et autres perdrix, que les haies abritent !

Les haies furent utiles. Elles le sont encore car elles contribuent en de nombreux endroits à une agriculture plus durable et respectueuse de l'environnement, mais leur entretien est coûteux, et les circuits de valorisation de leurs productions sont fragiles.

Celles qu'on plante maintenant ne sont pas les mêmes que celles du passé : elles sont plus larges et de maillage moins dense. Lorsque la monétisation de la production agricole fait passer la rentabilité immédiate avant la durabilité écologique, la pérennité du bocage fait face à une difficulté majeure. Comment peut-on convaincre un agriculteur qui vend son blé sur Internet en février pour récolter en juillet qu'il doit réduire sa surface agricole cultivable pour y replanter des haies ? Il faut donc encore démontrer et convaincre de leur bénéfice.

54. L'agriculture peut-elle vivre sans fertilisants ?

Les fertilisants sont l'ensemble des matières que l'on va apporter, le plus souvent *via* les terres, pour assurer la croissance et le développement des plantes. Parmi les matières fertilisantes, les règlements européens (y compris ceux concernant les pratiques « bio », ou « organiques ») distinguent

les engrais, dont l'objet est d'apporter des éléments nutritifs (au nombre de 27 parmi les 115 éléments du tableau de Mendeleïev), des amendements. Ces derniers peuvent être minéraux – leur but est de maintenir ou d'élever le pH du sol et d'en améliorer les propriétés – ou organiques, ce sont alors des combinaisons carbonées d'origine végétale, ou animale et végétale en mélange, visant à reconstituer ou entretenir le stock de matière organique du sol et à améliorer les propriétés physiques, chimiques ou biologiques des terres.

La production agricole apparaît donc comme une pratique transférant des éléments nutritifs depuis des champs jusque dans nos assiettes. Or ces transferts font diminuer la teneur des éléments nutritifs présents dans les terres, qui ne sont pas des mines exploitables indéfiniment. Pour s'en convaincre il suffit de se reporter aux expériences qui ont débuté vers 1875, par exemple à Grignon en France, où les essais sans apports de fertilisants ont donné, après quelques dizaines d'années, des rendements dérisoires.

Il faut remettre chaque élément en quantité au moins égale à ce qui est enlevé en moyenne par les récoltes et transféré ailleurs (sauf dans quelques milieux exceptionnels où la mer, des fleuves ou des volcans apportent ces éléments). Dans les sols jeunes, l'altération des roches apporte P, K et Mg, mais en quantité dérisoire par rapport à l'exportation par les cultures. Il est donc indispensable d'apporter ces éléments sous forme de fertilisants, sauf pour l'azote, qui peut être intégré autrement par les légumineuses, qui le puisent dans l'air.

Cependant, apporter ces éléments ne signifie pas nécessairement faire appel aux engrais de synthèse ou des mines. En pratique, l'énorme majorité des engrais P et K utilisés sur la planète vient des mines de phosphate et de potasse, et la majeure part de l'azote vient de la synthèse chimique. Le procédé Haber-Bosch, inventé en 1913, permet de fabriquer de l'ammoniac NH_3 à partir de diazote N_2 et de dihydrogène H_2 . L'ammoniac est ensuite converti en urée, sels d'ammonium et de nitrates.

Au plan théorique, on pourrait recycler les éléments N, P et K qui ont été exportés sous forme de production agricole et se retrouvent finalement en déchets ou effluents, animaux ou humains. Mais cela supposerait de transporter des lieux de consommation aux lieux de production (par exemple acheminer les boues d'épuration méditerranéennes ou chinoises au Brésil ou en Afrique, ou retourner les os du bœuf en Argentine et ceux de l'agneau en Australie). Le coût et le bilan environnemental et énergétique doivent être pris en compte, ainsi que des pertes dans le cycle : une

partie du potassium, très soluble donc très mobile, part dans les eaux. Certaines pertes d'azote sont incontournables. L'essentiel de l'azote des protéines produites par l'agriculture finit sous forme de nitrates dans les eaux d'épuration ou les effluents d'élevage, et l'on ne sait pas encore piéger les ions nitrate des eaux d'épuration pour en faire des formes solides transportables à remettre dans les champs. Le phosphore, lui, se perd moins et reste longtemps dans les sols. Ainsi, dans les années 1990, on a constaté que beaucoup de régions françaises en étaient tellement pourvues par les apports d'engrais des années 1960-1980 que la fertilisation était devenue inutile pour un certain temps.

Mais, parfois, le phosphore peut être trop retenu. C'est le cas de sols tropicaux dont les minéraux sont chargés positivement ou de sols riches en calcium ou en aluminium libre. Il faut alors soit apporter plus de phosphore que les plantes n'en prélèvent soit modifier le pH du sol.

En conclusion, on dira que l'agriculture devra toujours utiliser des fertilisants, mais qu'elle pourrait théoriquement s'affranchir des engrais miniers ou de synthèse chimique, au profit de la matière recyclée. Ce n'est que théorique. Dans l'état actuel des connaissances, les « fertilisants naturels » (on préférera le terme « recyclés »), constitués des résidus végétaux, des déjections des animaux d'élevage ou des déchets des activités humaines, ne sont pas en quantité ni disponibilité suffisantes pour une production agricole à la hauteur de nos besoins alimentaires globaux. En revanche, aux échelles locales, dans les régions dont le ratio population humaine + population animale/surface agricole est élevé, les éléments recyclés peuvent assurer l'essentiel de la fertilisation. C'est d'ailleurs souhaitable car le bilan environnemental et économique d'un élément utilisé deux fois ou plus *via* le recyclage est en général meilleur que s'il n'est utilisé qu'une fois.

55. Faut-il fertiliser la forêt ?

La forêt produit du bois, à son rythme. Cette production de biomasse n'est pas négligeable par rapport à celle d'une culture, mais la forêt produit aussi beaucoup de feuilles, de fruits, de branches et d'écorce que l'on ne récolte pas. Si l'on décide de récolter ces parties, le sol s'appauvrira d'autant. En France, la législation interdit la fertilisation et l'apport de boues en forêt soumise. Si l'on désire qu'elle produise beaucoup plus de bois, elle devient une culture d'arbres, qui requiert la sélection d'espèces et de clones productifs et une fertilisation pour remplacer les éléments que l'on retire.

L'exemple brésilien est éclairant. Le Brésil a planté 3,5 millions d'hectares d'eucalyptus, principalement pour la production de pâte à papier, mais aussi pour alimenter en charbon de bois ses hauts-fourneaux. Cet arbre produit peu de branches et pousse incroyablement vite : il atteint près de 30 m de hauteur au bout de huit ans, lorsqu'on le récolte et, dans son bois, la quantité d'éléments minéraux est très faible. Des firmes brésiliennes poussent à l'emploi de variétés génétiquement modifiées... Des essais en cours montrent qu'on pourrait apporter de l'azote en associant à l'eucalyptus une espèce légumineuse. On aurait alors une culture presque idéale... avec les inconvénients de toute monoculture sur de grandes surfaces : le développement de parasites, donc des traitements antiparasitaires et les effets écologiques attendus de telles pratiques. On serait alors très loin des forêts tropicales sèches si diverses, qui ont été déboisées il y a peu.

L'agriculture intensive crée-t-elle de la forêt ?

Au début du XIX^e siècle, un sol fécond produisait « 4 scheffels par journal », soit environ 8 quintaux de blé par hectare ; c'est dire que l'on semait environ 1 graine pour en récolter 8. Actuellement, en Europe occidentale, en Chine et dans certaines parties des Amériques, pour 1 graine semée, on en récolte environ 100.

Le fait que le rendement de blé ait été multiplié par 10 au cours des cent cinquante dernières années a de nombreux corollaires. Sur la même période, la population française a presque doublé. Pour nourrir cette population, il faut donc 5 fois moins de surfaces de sol. De fait, il y a eu l'exode rural, et beaucoup de zones agricoles ont été abandonnées. C'est ainsi que les surfaces forestières sont 2 fois plus importantes maintenant qu'il y a un siècle et demi (voir question 76) : avec un brin de provocation, on pourrait dire que l'agriculture intensive crée de la forêt. La question se pose crûment à l'échelle globale : pour une même quantité de production alimentaire, les choix d'une agriculture plutôt extensive ou plutôt intensive doivent être évalués au travers de scénarios fins, menés aux échelles globale et locales (cf. l'étude Agrimonde, 2009).

56. Où vont les pesticides ?

Dans un monde parfait, ils atteindraient leurs cibles et rien que leurs cibles, c'est-à-dire les parasites des cultures qui en diminuent les rendements. Mais ce n'est pas le cas et ce point distingue souvent la lutte chimique de la lutte biologique, où l'on choisit un prédateur spécifique du parasite.

En fait, dans la majorité des cas, les techniques d'épandage mises en œuvre font que la totalité des compartiments des agroécosystèmes (terre, air et eau) reçoit, directement ou indirectement, des pesticides (voir le schéma suivant). C'est pourquoi il est toujours possible d'en retrouver de petites quantités dans les eaux de surface, du fait du ruissellement, dans l'atmosphère puisque ces produits organiques sont partiellement volatils, dans les eaux de profondeurs, du fait de la lixiviation, chez le voisin à cause du mistral ou de tout autre vent (alors qu'il est interdit de traiter ses cultures dans ces conditions). Le plus souvent, environ 90 % à 95 % de l'apport rejoignent la terre.

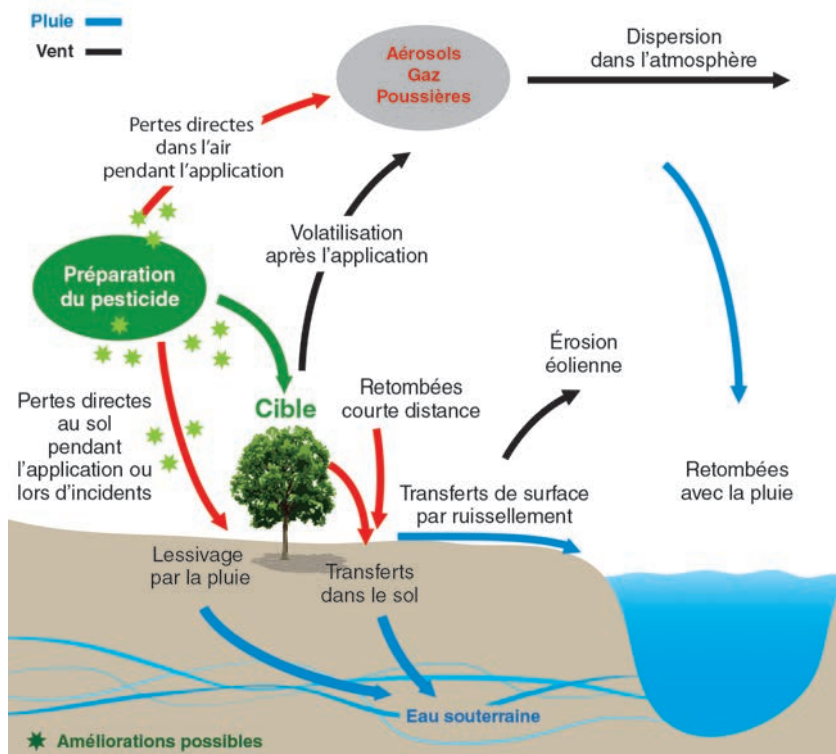
Examinons le cas d'un herbicide connu, inhibiteur de la photosynthèse, utilisé dans les cultures de céréales. Ce produit, une urée substituée, doit être appliqué à environ 1 200 g par hectare. Il doit donc être très dilué pour être employé de manière homogène. L'essentiel de l'apport tombera directement sur le sol, car un agriculteur ne laisse pas les « mauvaises herbes » se développer longtemps : elles entrent trop en compétition pour l'eau avec les plantes cultivées !

Des mesures faites dans l'ouest de la France illustrent que :

- 4 à 5 % des apports sont dérivés hors de la parcelle traitée lors de la pulvérisation, même en l'absence de vent, du seul fait que le tracteur provoque, en avançant, des tourbillons d'air ;
- 0,5 % rejoindrait les rivières par drainage ;
- 0,5 % irait la rivière par écoulement superficiel (ruissellement) dès les premières pluies ;
- 2 % rallieraient aussi la rivière à l'occasion du lavage du fond de la cuve de traitement.

Pour ce produit, la fraction volatile est très réduite, inférieure à 0,01 %.

On comprend donc la pollution très fréquente des eaux en France : une contamination significative peut être générée par des pertes en pesticides très faibles. Une fuite de moins de 1/1000^e de la masse d'herbicide épanchée sur une parcelle peut suffire pour contaminer l'eau qui s'en écoule au-dessus du seuil de potabilité.



Voies de dispersion d'un pesticide appliqué sur une culture.

Après avoir rejoint leurs cibles, les pesticides doivent agir sur ces dernières, mais aussi se dégrader assez vite pour ne pas se retrouver dans les récoltes, puis dans nos assiettes et nos bols alimentaires. C'est pourquoi presque tous les législateurs imposent, sauf exception très argumentée, que les pesticides mis sur le marché voient leur activité fonctionnelle se dissiper assez rapidement. Ainsi, on ne doit rencontrer que des pesticides dont 90 % de l'apport (la DT 90 ou *Dissipation Time* 90) se dissipent en moins d'un an dans les conditions d'emploi recommandées. La DT 90 de l'herbicide pris pour exemple étant d'environ 51 jours, la partie récoltée des céréales sera très faiblement contaminée à la récolte.

Par contre, cet herbicide est très rémanent en milieu aquatique (DT 50 = 1 660 jours) et il est banal de mesurer dans les nappes et les cours d'eau des teneurs supérieures au seuil de toxicité pour les végétaux aquatiques.

Les mécanismes de dissipation de l'activité de ces molécules organiques xénobiotiques de synthèse sont nombreux. On peut citer des processus abiotiques tels l'adsorption physico-chimique sur des constituants des terres, la photolyse, l'hydrolyse, la rétention sur des argiles, et surtout des mécanismes biotiques métaboliques qui sont le fait, soit des végétaux qui les reçoivent, et parfois en meurent, soit des microorganismes cibles ou encore de microorganismes non-cibles présents dans les terres. Car, *in fine*, les pesticides se retrouvent plus ou moins vite au contact des terres et de leurs microorganismes, qui les métabolisent plus ou moins en produisant des métabolites secondaires parfois plus toxiques que la molécule mère.

Ainsi, bien que les pesticides finissent par passer dans tous les compartiments de nos écosystèmes, nous ne devrions pas en retrouver dans nos assiettes à des niveaux écotoxiques, dans l'état actuel de nos connaissances. Encore faut-il que les produits utilisés soient strictement identiques à la formule brevetée et que les conditions d'emploi soient respectées.

On peut être tenté de contourner ces contingences en utilisant des plantes génétiquement modifiées (OGM) de façon à produire elles-mêmes des molécules qui les protègent. Ainsi, l'un des OGM végétal le plus répandu dans le monde met en jeu un gène d'origine bactérienne déterminant la production d'une protéine insecticide, dite toxine Bt. L'avantage est évidemment la simplicité du traitement. Des études, essentiellement américaines, ont constaté, près des grandes zones de production de maïs Bt (dans l'Indiana, ou en aval dans le Saint-Laurent), la présence de la toxine dans les sols et les milieux aquatiques, à des niveaux toxiques pour les invertébrés. Les toxines produites par les OGM peuvent donc aussi contaminer l'environnement. Plus inquiétant peut-être : on retrouve également en quantité très significative le gène codant pour la toxine (et non pas seulement la toxine elle-même), gène qui peut donc être transmis à d'autres organismes, mais c'est une autre histoire !

Le programme Écophyto

Actuellement, un gros projet de recherche et de développement vise à diviser par deux la dose d'apport des pesticides en France d'ici 2020. Ce projet, qui a pour nom Écophyto, est fondé sur le constat que les doses apportées sont en général trop importantes, et que l'agriculture peut s'accommoder de très légères baisses de rendement avec une diminution drastique de la fréquence des

.../...

.../...

apports de pesticides. Réussir ce projet, qui n'est pas du goût des industriels de l'agrochimie, fait l'objet de nombreuses recherches et demande beaucoup de progrès techniques, sur de nombreux fronts. Il peut s'agir de choisir et développer des variétés plus rustiques, tolérantes ou résistantes aux agresseurs, ce qui est inhabituel en sélection variétale, car les cultivars ont été, pour la plupart, élaborés pour un rendement maximum, mais avec des quantités d'intrants, phytosanitaires et engrais, maximales elles aussi. Il s'agit encore d'aménager les systèmes de culture et les itinéraires techniques des cultures (rotations, désherbages mécaniques, etc.) en n'augmentant pas trop leurs coûts. Enfin, il faut développer la lutte biologique. On parle d'« agriculture intégrée », c'est-à-dire qui intègre la qualité de l'environnement dans la production.

57. Les pesticides empoisonnent-ils la terre ?

L'objectif de tous les pesticides est d'éliminer les parasites de toute nature. On trouvera parmi eux :

- des herbicides, dans le but d'éliminer les « mauvaises » herbes, concurrentes des plantes cultivées pour la ressource en eau ;
- les insecticides, pour éliminer les insectes qui sucent les plantes ;
- les fongicides, chargés de ralentir le développement des champignons parasites ;
- les nématicides pour supprimer les vers ravageurs des racines ;
- les acaricides ;
- les bactéricides ; etc.

Le mot « pesticide » semblant porteur de trop de connotations négatives, l'appellation « phytosanitaires » prévaut aujourd'hui, l'objectif implicite devenant de rendre sains des végétaux qui ne l'auraient pas été. Des experts en communication ont franchi un nouveau pas : ces produits sont devenus des « phytopharmaceutiques », l'objectif désigné devenant alors la prévention de toute atteinte aux cultures.

Chimiquement, la majorité des pesticides sont, à l'exception de quelques substances naturelles comme le cuivre ou la nicotine, le résultat des constructions humaines pour contrer des organismes vivants : des molécules xénobiotiques, c'est-à-dire totalement étrangères à la vie, donc écotoxiques.

La majorité des organismes vivants limitant le développement des cultures choisies se développent dans l'espace aérien. C'est donc là que sont appliqués les pesticides, plus ou moins spécifiques d'un parasite donné. Mais force est de reconnaître que 95 % de ces apports rejoignent très vite la terre.

La plupart de ces êtres vivants n'ont aucune raison de devenir la cible des pesticides. C'est pourquoi les pesticides doivent être conçus pour respecter, autant que faire se peut, les organismes non-cibles. L'idéal serait donc de disposer d'agents très spécifiques de la peste que l'on souhaite réduire.

Quelles sont les conditions de mise sur le marché de tels produits ? La majorité des pesticides utilisés en agriculture ont pour cible des parasites de plantes destinées à l'alimentation humaine et/ou animale. Les législateurs planétaires ont mis des contraintes réglementaires, d'une part pour la mise sur le marché de tels produits, d'autre part pour leurs conditions d'utilisation par les agriculteurs et les jardiniers du dimanche, qui ont trop souvent la main lourde (cf. l'Union des entreprises pour la protection des jardins et des espaces publics : www.upj-asso.org) : il ne doit pas y avoir de risques inacceptables pour l'applicateur, le consommateur et l'environnement. Ces contraintes visent à ce qu'il n'y ait pas accumulation dans le sol, précisément pour ne pas empoisonner lentement les organismes vivants qui y résident. Cette exigence de non-accumulation impose de déterminer (mais une telle étude s'étale sur une dizaine d'années), selon les recommandations d'utilisation émises, la mobilité, la vitesse de dégradation du pesticide et des métabolites qui sont issus de cette biodégradation pour en déduire les conditions de persistance dans le milieu sol. Chaque fois que cette condition est respectée, et compte tenu des connaissances disponibles actuellement, les risques d'« empoisonnement des terres » sont faibles.

Ces restrictions n'ont pas toujours été respectées et ne le sont pas davantage maintenant. Nous avons donc des cas d'empoisonnement caractérisés de la terre par les pesticides. L'un des plus graves actuellement est causé par la chlordécone, un insecticide de la monoculture du bananier qui a été largement épandu dans les Antilles françaises jusqu'en 1993, et dans d'autres régions du monde, malgré une interdiction aux États-Unis dès 1976 et en France en 1990. Cette molécule est persistante : de biodégradation quasiment nulle, elle s'accumule dans le sol (à l'instar d'une autre molécule maintenant interdite : le DDT). Elle est cancérigène, et une partie passe du sol aux racines des plantes. Les racines et tubercules comestibles, comme l'igname ou le tarot, sont donc empoisonnés. La chlordécone a provoqué

un drame sanitaire. La remédiation semble difficile, et la meilleure prévention consiste à dédier les zones contaminées à des productions agricoles qui n'accumuleront pas le produit. Dans le cas de la chlordécone, c'est la réglementation qui n'a pas été appropriée.

D'autres cas d'empoisonnement du sol existent, en moins dramatiques car l'homme n'est pas touché directement mais les organismes du sol le sont, comme les vers de terre avec les insecticides néonicotinoïdes. Dans ce cas, c'est la législation actuelle à la date de publication du présent ouvrage qui n'est pas encore adaptée. Fongicide largement apporté à certaines cultures, en particulier à la vigne ou aux oliviers, sous forme de sulfate, de couleur bleue caractéristique (la bouillie bordelaise), le cuivre constitue un autre exemple. Il est également autorisé comme pesticide en agriculture biologique. Or le cuivre apporté s'accumule en totalité et de façon permanente dans les sols. Dans certains cas, après de nombreuses décennies d'apports, les concentrations peuvent dépasser 500 mg par kg de terre. Le cuivre peut alors être toxique pour d'autres productions végétales (la vigne n'est pas touchée car son enracinement est très profond tandis que le cuivre est en surface) et pour certaines fonctions microbiennes du sol, ce qui est attendu puisque le cuivre est utilisé comme biocide.

Une étude de 2013, menée par les universités belges de Louvain et de Gand vient cependant de démontrer que le cuivre des sols viticoles n'est pas toxique tant que la teneur reste inférieure au seuil recommandé par l'Union européenne (variable de 20 à 200 mg/kg de terre en fonction des propriétés du sol). Ici, la législation s'avère donc adaptée.

58. Apporte-t-on trop d'azote aux sols ?

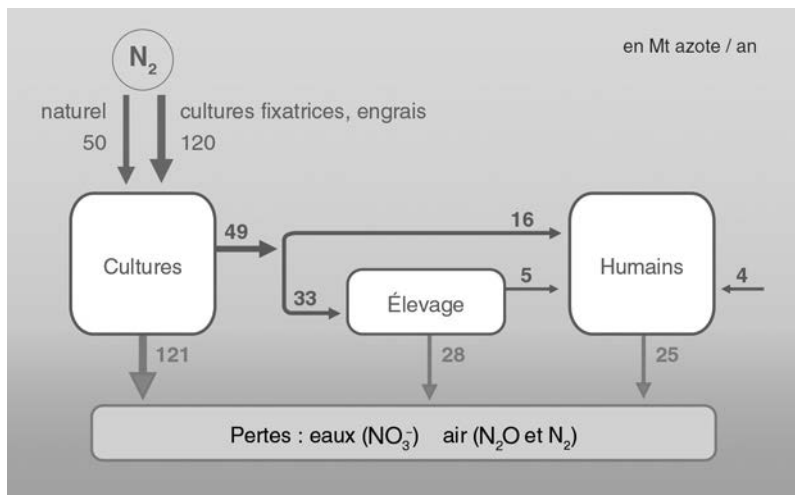
Le bilan planétaire de l'azote montre une augmentation considérable des quantités d'azote que l'homme introduit dans les sols pour la production alimentaire, soit en fabriquant des engrais de synthèse, soit en cultivant des plantes fixatrices comme les légumineuses. Le flux annuel est de 120 millions de tonnes par an, qui s'ajoutent aux 50 millions de tonnes d'intrants naturels. C'est là que le chiffre devient alarmant : sur les 120 millions de tonnes apportés, moins de 50 sortent des champs sous forme de récolte et seulement 21 arrivent à la bouche de l'homme, s'ajoutant à 4 Mt d'autres sources (pêche...). Le reste est perdu dans l'eau ou dans l'air, entraînant une contamination sans précédent des eaux et de l'atmosphère. La théorie et ses conséquences ont été largement

développées par James Galloway, et lui ont valu en 2007 le Tyler Prize, une sorte de prix Nobel de l'environnement.

L'azote apporté en excès a des conséquences considérables : la concentration en N_2O de l'atmosphère augmente sans cesse ; et les sols eux-mêmes évoluent. Par exemple, en Chine, les sols agricoles se sont acidifiés massivement en quelques années (ils ont perdu en moyenne une unité pH entre 1980 et 2000), essentiellement sous l'effet de fertilisants azotés apportés aux cultures.

Surtout, l'eutrophisation des eaux continentales, lacs, rivières, voire de l'océan maintenant, se généralise. Il s'agit de sur-alimentation du milieu en N ou en P, qui provoque un développement trop important d'algues, souvent microscopiques, dont la décomposition réduit ensuite l'oxygène disponible pour les autres organismes vivants.

La dénitrification, processus naturel qui convertit les nitrates en azote gazeux, apparaît comme la dépollution idéale. Cependant, elle forme essentiellement deux gaz, N_2 et N_2O . Si N_2 est parfaitement inoffensif, N_2O , puissant gaz à effet de serre, contribue au réchauffement de notre climat. On appelle ce phénomène un transfert de pollution : on contamine l'atmosphère au lieu des eaux. La seule solution consiste actuellement à éviter les pertes d'azote des systèmes agricoles et d'élevage.



Cycle mondial de l'azote.

Ces chiffres ne sont que des moyennes et masquent la diversité des situations. Il serait choquant de dire qu'on apporte trop d'azote en s'adressant aux agricultures qui en sont particulièrement démunies. Les solutions imposent d'abord d'apporter l'azote là où il y en a besoin. Cela implique une répartition spatiale raisonnée et synergique des productions végétales, de l'élevage et des sources d'aliments du bétail. À l'échelle de la parcelle, la problématique est de fournir l'azote quand les cultures en nécessitent, et de gérer ensemble les apports de carbone et d'azote pour maîtriser le stockage dans le sol ou la fourniture par l'activité biologique. Un enjeu agronomique qui est de plus en plus d'actualité, avec une marge de progrès considérable.

En outre, on constate l'impérieux besoin de recycler les effluents ou produits résiduels azotés. L'agriculture biologique montre ici son bénéfice évident ; par rapport à un atome d'azote d'engrais de synthèse, un atome d'azote recyclé en agriculture biologique a une vertu particulière, même si son devenir est le même : il a servi deux fois !

59. Pourquoi la disponibilité du phosphore est-elle cruciale ?

Le phosphore (P), premier élément chimique dont on connaît le découvreur en la personne d'Hennig Brandt, en 1669, permet de côtoyer un instant les concepts de durabilité et d'élément non renouvelable à l'échelle de l'homme. On a vu que toute production agricole se traduit par des transferts, depuis la parcelle cultivée jusqu'aux lieux de consommation des aliments, d'éléments nutritifs, en particulier de N, P et K, qui sont nutritifs tant pour les plantes que pour les humains. La conséquence directe en est une diminution de la teneur de tous ces éléments nutritifs dans les terres et une baisse de la fertilité native des terres cultivées.

La reconstitution de la fertilité initiale impose donc un retour des éléments prélevés. Ce retour était autrefois assuré par les apports des déjections animales de toute nature, y compris celles des humains. La pratique était courante dans la Chine que nous a contée Marco Polo, et répandue également dans les campagnes françaises – les excréments récoltés et séchés étaient dénommés « poudrette ». Mais la constitution de grandes agglomérations a pour partie supprimé cette restitution et nombre de terres agricoles ont vu leur fertilité amoindrie. En ce qui concerne l'azote, l'utilisation de légumineuses fixatrices symbiotiques peut permettre son retour.

Le cas du phosphore est tout autre, car pour P il n'y a aucun équivalent de la fixation symbiotique. Le destin de P doit être examiné dans un contexte écosystémique, c'est-à-dire incluant terre, plantes, microorganismes, eau, animaux et homme, soit l'ensemble des composants de son cycle biogéochimique. Le phosphore est indispensable à toute vie. Impliqué dans le transfert d'énergie de toute cellule vivante, il est par ailleurs un des constituants des acides nucléiques (ADN, ARN) et de nos os. Bien qu'une étude publiée en 2012 dans la revue *Science* ait rapporté l'existence, dans un lac salé, d'une bactérie qui substitue l'arsenic (élément au comportement chimique assez similaire) au phosphore, on admet encore que P ne peut être remplacé par aucun autre élément connu.

La seule source de phosphore a longtemps été la terre, d'où les plantes l'extrayaient et nous le donnaient à consommer, soit directement, soit *via* les herbivores que nous consommions. Ainsi, P quitte désespérément les champs avec les indispensables récoltes dont une fraction n'est jamais restituée car elle se perd dans les ruisseaux, les fleuves puis les mers.

Pour compenser les exportations de phosphore par les cultures, en particulier les céréales, qui en sont les plus grosses consommatrices, l'homme a déjà largement utilisé des mines de phosphates exploitables, majoritairement d'origine marine, qu'il a découvertes vers 1860. Mais les plus optimistes des prévisionnistes nous affirment que la durée de vie de cette ressource minière serait, à l'échelle de notre planète, de l'ordre 350 ou 400 ans, et les plus pessimistes ne vont pas au-delà de 150 ans.

Or le cycle biogéochimique du phosphore, dont en moyenne chaque sol laisse filer vers les eaux environ 1 kg par hectare et par an, ne permet pas la reconstitution marine des mines de phosphates. Et le genre humain n'est là que depuis environ 3×10^6 années, c'est-à-dire une durée très inférieure à la durée indispensable pour assurer géochimiquement le retour des phosphates à la surface terrestre. Le phosphore n'est donc pas, à notre échelle, une ressource renouvelable, et tout doit nous pousser à l'utiliser avec parcimonie et à le recycler au maximum pour tenter d'assurer notre propre durabilité.

60. Quels sont les enjeux de l'agriculture écologiquement intensive ?

L'agriculture écologiquement intensive (AEI) : un concept interlope médiatique qui fait le buzz du fait de l'oxymore liant énergiquement les termes « intensif » et « écologiquement » à « agriculture »...

Oser associer agriculture et écologie reste clivant dans l'opinion publique. En effet, l'agriculture intensive a bien mauvaise presse de nos jours. Et l'écologie telle qu'elle est médiatisée n'est pas très bien vue par les cultivateurs. Cette nouvelle déclinaison de l'agriculture doit être inscrite dans une longue liste de pratiques agricoles dont les gloires plus ou moins éphémères se sont succédé. On peut citer l'agriculture vivrière, l'agriculture raisonnée (comme si les agriculteurs producteurs de nos aliments ne raisonnaient pas, alors même que les bases des raisonnements de cette agriculture n'ont jamais été clairement explicitées), l'agriculture de précision, l'agriculture de conservation, l'agriculture durable, l'agriculture intégrée, l'agriculture biologique (qui est nommée organique chez tous nos voisins), l'agriculture conventionnelle (à connotation péjorative, que certains opposaient à la précédente) et quelques autres. Il faut quand même conserver en mémoire que, pendant des millénaires, nos ancêtres ont pratiqué la culture des champs, c'est-à-dire, au sens étymologique, l'agriculture, sans sur-nom.

Même si elle n'était pas exprimée avec autant de force qu'aujourd'hui, l'idée de bénéficier, puis d'intensifier, des mécanismes bio-écologiques pour produire de la nourriture est en fait fort ancienne puisque nos ancêtres latins, très sagaces, cultivaient déjà des légumineuses : ils avaient constaté que la production du blé augmentait après ce type de plantes. La pratique de la jachère découlait de cette observation. La transcription médiatique de ce type d'application en termes d'agriculture écologiquement intensive daterait de l'année 1998. Son adaptation à la sphère agricole française et dans certains organismes de recherche-développement est due à Bernard Chevassus-au-Louis et Michel Griffon, autour de 2008.

Il s'agit de faire en sorte que la nutrition et la protection des cultures, services actuellement assurés au moyen d'énergie fossile et d'intrants chimiques, soient désormais rendues par des acteurs vivants, limitant pollution et dégradation des sols, mais en permettant de plus forts rendements que par le passé. Le travail du sol, l'apport excessif d'engrais et l'utilisation de phytopharmaceutiques, principalement xénobiotiques, sont dans le collimateur. Le ver de terre devient la superstar de cette agriculture écologiquement intensive ; même si des chiffres particulièrement fantaisistes sur son activité sont publiés, il est l'outil privilégié de brassage des sols (voir question 21). Les bactéries fixatrices d'azote arrivent loin derrière lui dans le palmarès des actifs. La lutte biologique et la diversité végétale ont aussi un franc succès (voir question 48). L'énorme

enjeu qui s'applique notamment à l'AEI est donc de mieux domestiquer l'activité des microbes du sol et les relations plantes-microbes, dont on sait qu'elles peuvent optimiser les ressources.

61. Fatigue des sols : mythe ou réalité ?

Un peu d'histoires sur le « repos des terres » et leur « fatigue ». Selon Virgile (vers – 40 avant J.-C.), « un an sur deux, la moisson faite, tu laisseras ton champ oisif », mais il précise aussi que cette oisiveté peut être remplacée par une culture de fèves ou un apport de fumier. L'agronome romain du ier siècle Columelle a formalisé les observations de Virgile et propose des rotations triennales pour les terres. Il importe d'ajouter que ces agriculteurs apportaient du fumier, la pratique de la polyculture-élevage étant la norme.

À partir du Moyen Âge, l'idée de repos pour la terre apparaît en force dans des textes français. Il n'est question que de repos des terres sans parler de fatigue des sols, le concept de repos englobant alors aussi bien la friche que le pâturage. Des rotations et assolements de six ans sont mis en œuvre. Tout y est : racines à pivot avec le navet, plantes à enracinement superficiel traçant avec le froment, la légumineuse, les bovins pour produire du fumier et le retour du blé. Mais pourquoi six ans ? Dans la Bible proposée par J.F. Ostervald et publiée par la Société biblique protestante (Paris, 1859), un passage de l'Exode (XXXIII, 10 à 11) préconise : « Pendant six ans, tu sèmeras la terre et tu en recueilleras son revenu [...] Mais la septième année, tu lui donneras du relâche et tu la laisseras reposer. » On peut faire l'hypothèse que ces textes aient orienté les cultivateurs vers des rotations de six ans suivies d'un repos de la terre.

L'expression « fatigue de la terre » a été formulée vers 1850, lorsque des agronomes ont constaté qu'il ne suffisait pas de chercher à satisfaire les besoins des plantes en éléments nutritifs pour maintenir le rendement. Les causes des baisses de rendement observées en système de monocultures continues sont désormais très bien identifiées :

- causes agronomiques multiples : pratiques culturales défavorables conduisant à une dégradation de la structure des sols, à la baisse du taux de matière organique, au développement des plantes adventices (mauvaises herbes) et parasites ;

- cause biochimique : présence de résidus organiques phytotoxiques provenant soit de la rémanence de produits phytopharmaceutiques (cas actuels de désherbants de type sulfonyles en sols carbonatés et culture

de colza), soit de résidus de culture évoluant en conditions anaérobies, soit de sécrétions racinaires non consommées par les microorganismes telluriques ;

– cause pathologique : flore pathogène dans le sol et dans la rhizosphère résultant soit de la multiplication de ces pathogènes en conditions de monoculture, soit de l'élimination des prédateurs de ces agents pathogènes.

Dans la pratique, les causes sont souvent imbriquées, ce qui complique l'analyse. La lutte contre ces baisses de rendements implique certes de lutter contre la cause principale, si elle est identifiée avec certitude, mais elle va aussi passer par des rotations raisonnées systématiques des cultures pour éviter de multiplier les risques associés à une monoculture, toujours citée dans les descriptions de « fatigue des sols ».

Chapitre 4

Sol, risques et climat

62. Pourquoi recevons-nous la poussière du Sahara ?

Les poussières du Sahara sont familières aux habitants du sud de l'Europe. Elles colorent en ocre les enduits des murs exposés au sud et au sud-est. Elles teintent périodiquement les neiges des Alpes du Sud en rose, accélérant d'ailleurs leur fonte car les particules absorbent le rayonnement solaire ; et l'on retrouve dans l'épaisseur des névés et des glaciers la succession des épisodes de poussières. Elles remplissent les piscines, qui peuvent servir d'instruments de mesure de ces flux de particules. Le pare-brise des voitures se retrouve maculé de sable fin au petit matin, lorsque la pluie qui l'a déposé n'a pas été suffisamment forte pour le nettoyer ensuite.

Ces poussières touchent aussi le nord-ouest de l'Europe, mais on les perçoit bien moins dans les pays très verts. Les particules sont riches en quartz, en argiles, en oxydes d'aluminium et en oxydes de fer, qui leur donnent leur couleur variable du jaune au rouge. Elles proviennent des grandes dépressions centrales du Sahara, ont des tailles de quelques micromètres à une dizaine de micromètres et sont soulevées par le sirocco, vent chaud et sec qui souffle du sud au nord. Puis elles sont transportées en altitude quand il y a une dépression sur l'Europe. On y retrouve associés des pollens ou des insectes, comme parfois des criquets pèlerins. Ces épisodes sont plus fréquents de janvier à juillet.

L'harmattan, un alizé qui souffle vers l'ouest, envoie les poussières vers l'Atlantique. Il touche le centre, l'ouest et le sud du Sahara. On sait maintenant que les particules qu'il transporte, plus fines que les précédentes, se déposent jusqu'en Amazonie. Dans les années 1990, lorsqu'on a cherché à mieux comprendre le cycle du carbone et la production primaire des océans, c'est-à-dire la production de phytoplancton, on a réalisé que les éléments les plus limitants pour les microalgues étaient le phosphore et... le fer, et que c'était bien le Sahara qui fertilisait l'Atlantique. L'idée a même surgi dans quelques têtes de fertiliser l'océan avec du fer pour créer un puits de carbone ! En Asie, c'est vers les villes de la côte, comme Pékin, que le vent envoie les poussières du désert de Gobi et des zones avoisinantes.

Les spécialistes des sols se sont tôt demandé si ces particules des déserts contribuent à la formation des sols, comme autrefois les limons des périodes postglaciaires ont formé les loess du nord de l'Europe. L'extrapolation des flux mesurés, pouvant atteindre le millimètre par siècle en Méditerranée, est compatible avec une épaisseur significative de terre. Sur plusieurs îles de cette mer, une équipe a étudié en 2010 les *terra rossa* – des sols méditerranéens très fréquents, caractérisés par l'accumulation d'argiles et de limons rouges sur les roches calcaires. Ils ont montré, à partir des métaux rares contenus dans les minéraux, que la majorité des silicates venaient bien du Sahara. Il en est de même vers l'ouest : toutes les îles de l'Atlantique sous le vent des alizés, Cap vert, Bermudes, Antilles, Jamaïque, contiennent aussi dans leurs terres une petite part d'Afrique.

L'origine de la matière des sols est donc souvent complexe : si la majorité est faite sur place ou provient du voisinage proche, une petite partie peut venir de très loin. On sait également maintenant que tous les sols contiennent un peu de cendres des grandes éruptions volcaniques, et même une pincée de matière extraterrestre.

Ces flux de poussières sont maintenant très étudiés, pour des raisons diverses. On s'intéresse à leur rôle sur le climat, via la formation des nuages et des cristaux de glace, ou dans l'humidité de l'atmosphère. Leur contenu en calcium et magnésium pourrait constituer une part importante de la nutrition minérale des forêts. L'impact sur la santé amène même à prévoir en temps réel les concentrations en particules dans les grandes villes. Plusieurs réseaux mesurent ces particules, par satellite, par des capteurs du rayonnement tournés vers le ciel, par des radars, et par des capteurs au sol ou embarqués sur les avions de ligne.

On s'inquiète donc de l'impact des poussières minérales sur notre climat et notre santé. Mais il ne faut pas oublier que le problème principal est bien l'érosion éolienne des zones sèches les plus sensibles, comme le Sahel ou le bassin du lac Tchad, où le vent retire de ces régions le peu de terre fine qu'elles recèlent et qui est si nécessaire à la végétation.

L'érosion éolienne aux États-Unis

L'épisode d'érosion éolienne qui a le plus marqué les esprits est le *Dust Bowl* des années 1931-1936 aux États-Unis et au Canada, immortalisé par les romans de J. Steinbeck et les chansons de W. Guthrie (voir question 80). Par suite d'épisodes de sécheresse, du retournement des prairies et du labour massif des grandes plaines du centre lors des décennies précédentes, les couches de surface des sols nus, exposées aux intempéries et appauvries en matière organique, ont été balayées par des vents violents.

La perte des cultures, contribuant à laisser les sols nus les années suivantes, et le surpâturage dans les prairies restantes ont auto-entretenu le phénomène, et la crise économique par la même occasion. On sait maintenant que ces épisodes climatiques sont corrélés au phénomène météorologique El Niño du Pacifique sud. Plus de 400 000 km² furent affectés, et plus de 2 millions de personnes ont finalement émigré des grandes plaines en dix ans. Les nuages de poussière apocalyptiques, qui sont allés jusqu'aux grandes villes de la côte Est, ont frappé tous les esprits et non pas seulement les ruraux ruinés.

La réaction des pouvoirs publics mettant en place, à partir de 1933, une prévention généralisée de l'érosion aux États-Unis fut bénéfique. Le pays est ainsi devenu un des leaders de ce que l'on dénomme l'« agriculture de conservation ». Cette dernière fait notamment appel au travail du sol en courbes de niveaux ou au non-labour, au maintien d'une couverture végétale, à l'utilisation de rotations et à la restitution des matières organiques au sol pour limiter l'érosion.

63. Le sol fabrique-t-il l'atmosphère ?

Dire que le sol fabrique l'atmosphère, ce serait exagéré, mais on peut dire que les organismes vivants ont fait l'atmosphère que nous connaissons. Elle est constituée d'azote pour 78 %, d'oxygène pour 21 %, d'argon pour 1 % puis, en moindre quantité, de vapeur d'eau, de dioxyde de carbone, de néon, d'hélium, de krypton, de méthane.

Si l'azote, l'argon, l'eau, le néon sont là depuis longtemps, depuis le dégazage initial de la planète, la concentration des autres gaz est largement déterminée par l'action du vivant. Au départ, il n'y avait pas d'oxygène. Ce sont les algues photosynthétiques qui ont commencé à en produire, mais cet oxygène a été piégé par le fer des océans pour former des oxydes de fer. Quand ce fer a été épuisé, l'oxygène O_2 est apparu en quantités notables dans l'atmosphère, il y a environ 600 millions d'années. Notre dioxyde de carbone (CO_2) résulte aussi des équilibres entre photosynthèse, respiration des écosystèmes et altération des roches.

Le cas du CO_2 est très intéressant. Il y a 400 millions d'années, il y en avait 20 fois plus que maintenant. C'est à cette époque que sont apparus les arbres, qui, par la photosynthèse, ont consommé le CO_2 pour en faire, à l'époque du carbonifère, de la matière organique que nous retrouvons maintenant sous forme de charbon. Nous apprenions autrefois que toute cette matière organique s'était fossilisée car ces arbres géants du carbonifère vivaient dans des lagunes où le milieu réducteur conserve la matière organique. Mais une équipe internationale a montré, en 2012, que la fin du carbonifère, il y a 300 millions d'années, correspond à l'apparition, chez les champignons, des enzymes permettant de dégrader la lignine, un constituant important du bois, des tiges, des racines et des nervures des feuilles des végétaux.

Ces enzymes ne se trouvent que chez les champignons de type pourriture blanche, présents partout dans nos forêts. C'est en comparant les séquences d'ADN de 30 espèces de ces champignons et de leurs enzymes qu'on a pu dater l'apparition de ce premier champignon consommateur de bois. Le monde, pourtant riche de plantes, d'insectes et de poissons modernes, devait donc être bien différent avant lui : on doit imaginer que les sols étaient alors couverts d'une épaisse tourbe, même en milieu sec, et que les végétaux morts s'accumulaient avant d'être entraînés vers les fleuves et les lacs. Autre conséquence, le champignon, en dégradant la matière végétale, a établi un nouvel équilibre entre consommation de CO_2 par la photosynthèse et production par la respiration, avec une concentration plus élevée depuis les derniers 250 millions d'années. Dans ce cas-là, oui, on peut dire que les sols ont fabriqué l'atmosphère. Et par la suite, ce sont les variations du climat et de la biosphère qui ont régulé la composition de l'atmosphère terrestre. Jusqu'à ce que l'homme s'en mêle en changeant le climat depuis le XIX^e siècle.

64. Le sol peut-il influencer le climat de notre planète ?

Très largement ! Il y a deux domaines principaux où le fonctionnement des sols contribue à contrôler le climat : le cycle de l'eau et la composition de l'atmosphère. Actuellement, le vivant influence considérablement la concentration des gaz à effet de serre, et c'est dans nos champs que cela se passe.

Les trois principaux gaz à effet de serre en augmentation, qui sont la cause du réchauffement actuel, sont le dioxyde de carbone (CO_2), pour plus de 50 % du réchauffement, le méthane (CH_4) pour environ 20 % et le protoxyde d'azote (N_2O) – aussi nommé oxyde nitreux ou gaz hilarant – pour près de 10 %. Or les principaux émetteurs de ces gaz, chaque année, sont... les microbes du sol. Ils émettent 200 milliards de tonnes de CO_2 par an, mais nous discuterons ce bilan du CO_2 à la question 67.

Les émissions de méthane par les sols, les zones humides et les termites comptent pour la moitié des 600 millions de tonnes de méthane émis chaque année, le reste se partageant entre les émissions des ruminants, des industries, de l'énergie et des feux de biomasse. Dans cet ensemble, un tiers est d'origine naturelle et deux tiers attribuables à l'action de l'homme, d'où la forte augmentation de ce gaz dans l'atmosphère. Le méthane est notre gaz de ville.

Peut-être, une nuit, avez-vous eu la chance de voir la lueur d'un feu follet planer sur les marécages ou dans un cimetière ? Elle proviendrait d'une inflammation spontanée du méthane en présence de phosphore. Ou bien avez-vous tenté d'allumer les grosses bulles qui sortent des marais ? Le méthane est produit dans les sols dans des conditions particulières, en l'absence d'oxygène, quand le milieu est très réducteur, une condition qui n'est remplie que dans des sols gorgés d'eau où l'oxygène est consommé plus vite qu'il n'arrive et où il n'y a plus d'autres oxydants. À partir des matières organiques, une suite complexe de fermentations dues à de nombreux groupes microbiens produit des acides organiques ou des alcools, et *in fine* de l'acétate. Des Archaea dites méthanogènes clivent ensuite la molécule d'acétate en méthane et CO_2 . Plus haut, dans le sol où les conditions sont aérobies, des bactéries et Archaea appelées méthanotrophes, à l'inverse, consomment le méthane qui diffuse.

La culture de riz inondé, première céréale mondiale en tonnage, augmente les émissions des sols. Le plant de riz, dont les tiges creuses conduisent les gaz pour oxygéner ses racines, sert d'ailleurs de tuyau pour

l'émission directe du méthane du sol vers l'atmosphère. Les si beaux paysages de rizières inondées libèrent donc un polluant invisible et inodore dans notre atmosphère. Afin de réduire le processus, certaines techniques culturales préconisent d'assécher le sol après la récolte et avant l'enfouissement des tiges et feuilles pour que leur biodégradation soit aérobie.

Les sols sont aussi l'émetteur principal de N_2O . Trois processus bactériens sont à son origine. La dénitrification est la transformation naturelle des nitrates en azote gazeux, avec pour produits N_2 et N_2O en proportion très variable. Elle a également lieu en conditions anaérobies. Elle est effectuée par de très nombreuses espèces microbiennes qui, lorsqu'il n'y a plus de dioxygène, utilisent l'ion nitrate en remplacement, pour respirer. On sait maintenant que c'est l'expression d'une enzyme convertissant N_2O en N_2 , la *nitrous oxide reductase*, qui détermine principalement la partition entre N_2O et N_2 . La nitrification, processus inverse et aérobie, transforme l'ammonium en nitrites puis nitrates, et peut aussi libérer N_2O comme co-produit. Enfin, la réduction dissimilative des nitrates en ammonium, associée à des fermentations, peut aussi en produire. Plusieurs études ont démontré que les flux de production de N_2O sont proportionnels aux flux d'intrants azotés en agriculture. Ces flux ayant décuplé dans le dernier siècle, la pollution de l'atmosphère par N_2O ne cesse d'augmenter.

La production de N_2O pose ainsi un problème très important de déplacement de nuisance. On connaît depuis longtemps le rôle de la surfertilisation et de la surcharge d'animaux d'élevage dans la contamination des eaux par les composés azotés – les nitrates principalement. Les milieux aquatiques s'eutrophisent et la diversité végétale se restreint. La dénitrification, qui convertit les nitrates en azote moléculaire, gaz parfaitement inerte, apparaissait donc comme la dépollution idéale. Elle peut être stimulée par exemple dans les zones marécageuses en bas de versant, ou dans les ripisylves, forêts bordant les cours d'eau. Mais voilà, quand on dépollue l'eau ici ou là, à l'échelle locale, on pollue l'atmosphère à l'échelle globale. Il faut s'y résoudre, on doit bien éviter toute fuite d'azote des agrosystèmes et non pas seulement chercher à dépolluer.

Parce qu'ils constituent une étape importante dans le cycle de l'eau, les sols affectent aussi le climat, plus ou moins directement et à différentes échelles. À l'échelle locale d'abord. Toutes choses égales par ailleurs, il fera plus frais (jusqu'à 2 °C de moins) au-dessus d'un écosystème dont le sol est mouillé que s'il est sec car l'évaporation, plus forte, y modifiera le flux d'énergie. À l'échelle régionale ensuite. La nature et l'état physique du sol

déterminent le partage entre les trois devenir de l'eau de pluie. Elle peut s'infiltrer vers les nappes phréatiques, elle peut être stockée dans le sol et être disponible pour les plantes qui vont l'évaporer, ou bien, si le sol est saturé, ruisseler directement sur la surface vers la rivière puis l'océan. Ce partage affecte le bilan d'évaporation, l'humidité de l'air, la nébulosité, et finalement les précipitations, aux échelles régionales et continentales. À plus long terme, les processus d'érosion, de désertification ou, inversement, de formation des sols contrôlent encore plus largement le cycle de l'eau et le rôle de tous les écosystèmes terrestres dans le climat.

Les sols impactent donc notre climat. Et les changements que nous pouvons imposer aux sols influenceront considérablement le climat futur.

65. Comment le changement climatique va-t-il influencer sur nos sols ?

La répartition géographique des types de sols sur la planète se superpose à celle des grandes zones climatiques : le premier facteur de différenciation des sols est à l'évidence le climat. Pour rechercher les effets d'un changement climatique sur les sols, on peut commencer par faire glisser la carte des sols sur celle des continents, dans la direction que nous indiquent les changements climatiques prévus, ou qui ont eu lieu au cours de l'histoire de la planète. Jusque-là c'est plutôt simple. Il faut néanmoins tenir compte de quatre difficultés majeures :

- les changements climatiques sont causés par, ou associés à, des changements de la composition de l'atmosphère, qui peuvent directement conditionner les propriétés des sols. Ainsi de la teneur en CO_2 de l'atmosphère ;

- nos certitudes relatives portent sur l'évolution de la température, et nos plus grandes incertitudes sur l'évolution de la pluviométrie. Or pluviométrie et température conditionnent le bilan hydrique qui règle la distribution des biocénoses et des sols. L'eau est le carburant de l'ensemble des processus chimiques d'altération des minéraux des roches et sols, et d'autre part le véhicule des ions, des molécules et de particules fines dans les sols ;

- l'homme utilise les changements climatiques en cours pour modifier la gestion des sols. Or prédire le comportement humain est compliqué ;

- enfin, les changements climatiques en cours et l'évolution des pratiques de gestion des sols sont très rapides par rapport à la vitesse de la pédogenèse.

L'augmentation de la teneur du CO_2 dans l'atmosphère modifie la quantité de carbone fixée par la végétation, si la production végétale n'est pas limitée par un autre facteur, température, eau ou fertilité des sols. Seule, elle modifiera peu les propriétés des sols, sauf une très légère tendance à accélérer l'acidification, liée à la dissolution du CO_2 dans l'eau. L'augmentation de la production végétale potentiellement provoquée par l'augmentation de la température sera, ou ne sera pas, compensée par l'augmentation de la minéralisation des matières organiques des sols. Quelques exemples pour montrer la diversité et la complexité des prévisions. Dans la toundra arctique, où le gel rend inaccessible à la dégradation des quantités énormes de carbone, l'élévation des températures libérera probablement des quantités gigantesques de méthane et provoquera sans doute, à terme, une augmentation considérable de CO_2 . Mais, si la pluviométrie augmente en parallèle, les zones humides qui produisent et accumulent du carbone sous forme de tourbe se conserveront, voire s'agrandiront. Dans les forêts boréales, la hausse de la température favorisera sans doute davantage, dans un premier temps, la fonte des humus épais et des tourbes que l'incorporation profonde du gain de production végétale.

À plus long terme, une évolution positive du stock de carbone est plus probable. En effet, les stocks de carbone des forêts boréales sont élevés dans les horizons de surface, et faibles en profondeur. Mais les stocks profonds sont plus élevés dans les sols des régions plus chaudes et humides. Par ailleurs, on peut parier sur le fait que les Chinois, qui souffrent de surpopulation chronique, recherchent des terres et peuvent investir, parviendront à coloniser et cultiver la Sibérie orientale, si le climat se réchauffe. En fonction des spéculations et pratiques agricoles, cela pourrait conduire à de très fortes et rapides baisses des stocks de carbone, et même des pertes de sol si l'érosion n'est pas contrôlée. Sur le pourtour méditerranéen, l'augmentation probable de la sécheresse, conjuguée à celle des événements extrêmes, favorisera vraisemblablement l'érosion des sols. Enfin, la fonte progressive des glaces continentales et la dilatation de la mer lors de son réchauffement vont noyer les sols de grands deltas, souvent très peuplés et intensément cultivés.

L'évolution des stocks de carbone des sols à l'échelle mondiale est abondamment étudiée avec des modèles complexes, pour lesquels les incertitudes restent fortes. Dans un article récent, Pia Gottschalk *et alii*, utilisant les projections climatiques du GIEC et un modèle robuste de dynamique du carbone (RothC), suggèrent que les sols resteront un puits de carbone

en 2100, malgré de fortes pertes dans les écosystèmes septentrionaux. Ils concluent leur article ainsi : « Concernant ce bilan délicat, nous devrions arrêter de nous poser la question de savoir si le carbone des sols va augmenter ou diminuer, et plutôt concentrer nos efforts pour améliorer la connaissance des facteurs qui déterminent la taille du changement, et les pratiques qui peuvent être mises en place pour augmenter les stocks de carbone. »

66. Que se passe-t-il s'il y a trop d'eau dans les sols ?

Il peut se passer un phénomène particulier quand le sol est saturé d'eau. La diffusion du dioxygène O_2 depuis l'air vers le sol est considérablement ralentie. Si la vitesse d'approvisionnement en O_2 devient inférieure à la vitesse de consommation, l'oxygène disparaît : le sol devient anaérobie. Les animaux ne peuvent survivre, les racines sont asphyxiées. De nombreuses bactéries, quant à elles, peuvent trouver d'autres molécules pour respirer et continuent quelques activités assurant la fermentation des matières organiques. En termes chimiques, le milieu devient « réducteur », ses constituants sont « réduits » et cela change beaucoup de choses.

L'effet le plus visible concerne le fer du sol. Les oxydes de fer donnent aux sols leur couleur rouille à brun. En milieu réducteur, le fer change de degré d'oxydation, le sol prend alors une couleur gris-bleu à bleu-vert. Les horizons de sols réduits en permanence sont d'un gris froid. Ils portent le nom de gley et sont en général malodorants car il s'y forme des composés soufrés volatils. De plus, le fer réduit devient soluble et se déplace. Si le sol redevient aérobie, le fer précipite à nouveau en forme oxydée, rouge orangé. Ce processus cyclique donne aux horizons des couleurs marbrées ou tachetées gris-orange. On parle d'hydromorphie, littéralement un aspect témoignant de la présence temporaire d'eau. Le fer ne pose pas de problème en soi, il offre simplement un diagnostic visuel d'oxygénation insuffisante.

Des écosystèmes remarquables se sont installés sur les sols engorgés en permanence ; comme les forêts alluviales, les landes humiques et les tourbières, qui accumulent la matière organique. Un milieu engorgé n'est pas forcément anaérobie, en particulier si l'eau circule ou bénéficie d'une grande surface d'échange avec l'air. Cependant, certaines plantes des milieux humides se sont adaptées aux sols réduits. Les roseaux, les carex ou le riz « aèrent » leurs racines tout simplement grâce à un tissu creux à l'intérieur des tiges et les racines, qui sert à faire circuler l'air. L'accumulation de la tourbe, faite de débris végétaux non décomposés, peut aussi être

considérée comme un processus permettant d'élever la végétation au-dessus de l'eau et d'aérer la partie supérieure du sol. Il en est de même des touradons, ces petits monticules de tissus morts à la base des touffes de poacées comme la molinie. Les palétuviers, arbres des mangroves, eux, jettent leurs racines aériennes depuis les tiges.

L'engorgement temporaire est un phénomène très fréquent : beaucoup de terres en Europe, en particulier en plaine et sur les plateaux, sont concernées. Cela peut arriver soit parce qu'une nappe d'eau souterraine monte et descend au rythme des saisons et des pluies, soit parce que le sol lui-même présente un niveau imperméable. Ce dernier cas se produit en particulier quand le lessivage des argiles, un processus naturel, a provoqué leur accumulation dans les horizons B. La nappe qui se forme au-dessus est dite nappe « perchée ». Depuis des millénaires, l'agriculture a été confrontée à ce problème ; depuis les années 1960, elle y fait face systématiquement par un aménagement qu'on appelle le drainage. Ce dernier recourt à des réseaux de fossés ou de drains perforés enterrés.

En Europe, le changement climatique va se manifester par un accroissement à la fois des sécheresses estivales et des pluies hivernales. Il va aussi provoquer une montée du niveau marin. On s'attend donc à un impact important sur les zones humides, allant de leur assèchement à leur extension, comme à des engorgements temporaires de zones qui n'y étaient pas sujettes auparavant.

Les services rendus par les sols des zones humides

Les zones humides englobent un grand nombre de milieux caractérisés par la présence d'eau douce, saumâtre ou salée. Il peut s'agir de marais, lagunes, tourbières, prairies humides, ripisylves, forêts inondables, mangroves, etc. Ces zones sont maintenant très bien classifiées par l'European Union Nature Information System, ou en France, par les schémas d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE). Plus encore que les autres écosystèmes, les zones humides rendent à l'homme des services précis (voir question 20), les plus évidents étant ceux de régulation hydrographique – notamment l'écrêtage des crues –, de création de zones récréatives, de productions agricoles, sylvicoles et aquacoles particulières, de réserve de biodiversité, de régulation du climat local ou global.

L'épuration de l'eau constitue un service plus discret mais non moins notable, dû en particulier aux prairies humides, aux bandes enherbées, aux forêts

.../...

.../...

inondables et aux ripisylves, ces forêts qui bordent naturellement les rivières. Dans ces milieux, la forte production organique et l'importante activité des microorganismes tant aérobies qu'anaérobies permet de biodégrader non seulement le carbone organique dissout dans les eaux, mais aussi les toxiques organiques et les pesticides, et d'immobiliser des contaminants, comme du phosphore, des polluants organiques persistants et des métaux toxiques. Enfin, les conditions anaérobies permettent la dépollution des nitrates par le processus de dénitrification, c'est-à-dire leur conversion biologique en diazote. Ces zones humides qui épurent l'eau des rivières ou celles qui s'écoulent des bassins-versants (en particulier les eaux agricoles) vers les rivières sont parfois dénommées « zones tampons ». L'épuration passe aussi par le blocage des particules en suspension provenant de l'érosion et des contaminants qui y sont fixés. L'homme a d'ailleurs copié ce processus naturel d'épuration chimique en construisant des unités de lagunage artificiel des eaux usées.

Mais ces zones humides sont vulnérables et, en raison du changement climatique qui risque de les déstabiliser, leur préservation s'avère de plus en plus nécessaire.

67. Le sol est-il un puits de carbone ?

Le dioxyde de carbone, ou CO_2 , étant le principal gaz à effet de serre responsable du réchauffement climatique actuel, il est essentiel pour notre futur immédiat de savoir quels réservoirs peuvent, sur la planète, contribuer à augmenter sa concentration (se comporter en sources) ou au contraire la diminuer (se comporter en puits).

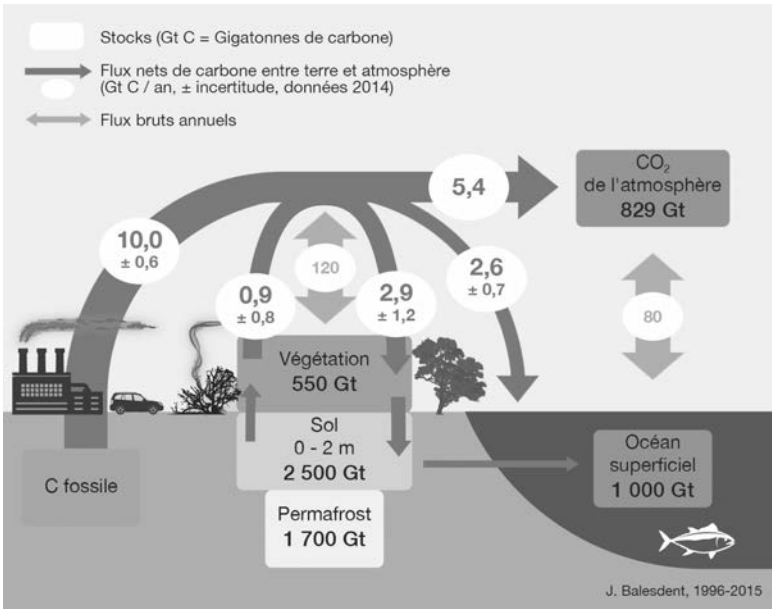
Le sol constitue le plus gros réservoir superficiel de carbone qui échange avec l'atmosphère, dans un cycle où se succèdent en permanence la production végétale, qui transforme le CO_2 en matière organique, et la décomposition des matières mortes et la respiration par les décomposeurs, qui transforment les matières organiques en CO_2 . Les chiffres sont les suivants, tels qu'ils ont été établis par le GIEC dans son rapport de 2013. L'homme injecte chaque année dans l'atmosphère 10 milliards de tonnes de carbone d'origine fossile, auxquels s'ajoute environ 1 milliard par combustion des forêts intertropicales. Le sol, contient, lui, 2 000 milliards de tonnes de carbone dans son premier mètre, soit l'équivalent de plus de deux siècles d'émissions. Or on sait que le stock de carbone des sols peut changer en quelques décennies, d'abord sous l'influence du mode d'utilisation des terres.

Voici un exemple spectaculaire : la déforestation suivie de la mise en culture dans le piémont pyrénéen peuvent diminuer le stock de carbone du sol de 50 % en trente ans. Réciproquement, l'installation de prairies peut remonter le stock d'autant, mais ce sera plus lent. On comprend donc que la gestion des terres peut impacter considérablement le bilan carbone de l'atmosphère. C'est pourquoi il est indispensable, pour le futur de l'humanité, de maintenir ou d'augmenter les réserves de carbone des sols. D'autant plus qu'une teneur en carbone élevée en surface favorise la végétation et protège l'écosystème de la dégradation.

Le flux d'émissions de carbone fossile en 2010 se révèle pire que celui du pire scénario envisagé par le GIEC en 1990. Selon le bilan planétaire actuel, les sols se comportent comme un puits de carbone, avec une accumulation de l'ordre de 2 milliards de t/an, essentiellement dans l'hémisphère nord ; l'océan superficiel constitue un autre puits du même ordre, ce qui explique que le réservoir atmosphérique augmente près de deux fois moins vite que le flux d'émissions fossiles. Le puits potentiel constitué par le sol, même s'il n'est pas infini, est donc très grand à l'échelle de notre siècle.

Cependant, le réchauffement pourrait bien inverser la tendance. Les sols nordiques contiennent de grandes réserves de matières organiques. Dans les sols arctiques, elles sont congelées et, dans les tourbières d'Écosse, de Scandinavie, de Russie ou du Canada, elles sont protégées de la biodégradation par l'engorgement du sol, son acidité et le froid. Le réchauffement accélère leur biodégradation et ces zones sont actuellement devenues de très importantes sources de carbone. Par ce processus d'émission de carbone des sols, le réchauffement tend à s'auto-entretenir.

On s'est demandé si le carbonate de calcium (le calcaire) qui se forme dans les sols arides peut être un puits de carbone, mais le bilan géochimique montre que chaque atome de calcium piégé dans le carbonate du sol sera un atome de calcium de moins pour immobiliser du carbonate dans l'océan. Pour les mêmes raisons, la dissolution des amendements calcaires qui sont apportés en agriculture a aussi un bilan de carbone nul. Ce sont les bilans globaux d'acidité et d'altération du calcium des roches qui régissent le poste du bilan de carbone et non pas la formation ou la dissolution de carbonates dans les sols.



Les flux nets annuels de carbone entre la Terre et l'atmosphère.

Une augmentation du carbone du sol (2 500 Gt) de 4 % par an (10 Gt/an) compenserait les émissions de carbone fossile (données du GIEC, 2014).

68. Pourquoi l'érosion est-elle plus forte aujourd'hui ?

Les chiffres sont implacables. Une synthèse de 2009 a compilé les données de plus de 200 études publiées sur les pertes globales de sol par érosion. L'érosion des sols cultivés en agriculture conventionnelle est, en moyenne mondiale, de l'ordre de 1 mm de sol par an. C'est 10 à 100 fois plus que les niveaux naturels d'érosion (chiffre variant selon la méthode d'estimation de ces derniers) et 15 à 20 fois plus que les vitesses de formation du sol. La comparaison deux à deux de sols cultivés et non cultivés aboutit aux mêmes conclusions. De très nombreuses régions du monde sont touchées en Chine, en Asie centrale, en Afrique, en Amérique du Sud et en Indonésie. Même en Europe, où les sols des zones de plaine sont peu exposés et les techniques de gestion du sol relativement respectueuses, où la reforestation l'emporte sur la déforestation depuis un siècle, l'érosion diffuse fait perdre beaucoup de terre.

En France, 18 % des terres sont sujettes à un aléa érosif moyen à élevé. Il s'agit essentiellement des terres de grande culture du nord-ouest du bassin parisien ou de l'Aquitaine. Pourquoi l'érosion s'est-elle accrue ? Parce que la demande alimentaire mondiale a doublé dans les cinquante dernières années et amène de nombreuses régions du monde à effectuer une révolution agricole vers des cultures intensives, à coloniser de nouvelles terres, en particulier pour les productions de cultures annuelles ou industrielles. Ce sont les mises en culture de zones forestières qui sont les plus fragiles ou, ailleurs, les zones incendiées. Dans les zones de pâturage et les prairies, la pression par le bétail tend également à augmenter.

Chaque cas est particulier mais, de façon générale, les facteurs de l'érosion sont les suivants. La mise du sol à nu avant la plantation ou chaque année pendant l'interculture expose la terre aux intempéries. De plus, le travail du sol affine la terre et facilite sa déstructuration et son entraînement. Le tassement réduit l'infiltration de l'eau et augmente en conséquence le ruissellement de surface. D'autres facteurs diminuent les taux de matière organique de la partie la plus superficielle du sol, donc sa stabilité : le labour par retournement remet à la surface un sol pauvre en matière organique, la diminution des restitutions végétales en abaisse aussi la teneur, la disparition de l'élevage des zones de grande culture prive ces dernières des apports de fumiers. À l'échelle des paysages, l'augmentation de la taille des parcelles et la perte des haies ou des bordures enherbées accélère la dynamique hydrique de l'érosion.

Les conséquences désastreuses de colonisations agricoles mal gérées ont déjà été illustrées par le passé. Sur le pourtour méditerranéen, la roche est à nu presque partout. Or on sait qu'il y avait autrefois des forêts avec de riches humus là où l'on trouve maintenant garrigue, maquis ou roche. C'est l'émergence de l'agriculture et de l'élevage, et son développement de plus en plus important dans les derniers siècles avant notre ère jusqu'à l'époque romaine, qui ont abouti à l'érosion de ces sols. On retrouve les traces actuelles des sols perdus dans les sédiments que l'on peut dater. L'ensablement des ports antiques par le matériau perdu témoigne de cette phase d'érosion massive. Les écrits anciens ou la recherche des archéologues nous rapportent la période de ces événements, tels que la disparition des ports de Fréjus sur l'Argens, d'Ostie sur le Tibre, ou de Ravenne sur le Pô. Chaque période de colonisation a érodé la terre : plus récemment, les États-Unis ont perdu le tiers de leur couche de sol depuis le début de la colonisation.

Pour frapper les esprits, John Crawford, de l'université de Sydney, a lancé cette phrase choc dans *Time*, en décembre 2012 : « il reste soixante ans de sol ». Il y a donc, en ce début de siècle, une urgence majeure pour préserver les sols, qui risquent d'être perdus à jamais. Les moyens de lutte et de prévention sont connus et relativement peu coûteux ; les solutions relèvent de la politique, de l'éducation et du développement. Mais surtout, les consommateurs des pays développés ou émergents sont co-responsables de cette destruction globale et peuvent agir pour la sauvegarde des sols, par exemple en privilégiant les circuits de l'agriculture durable ou plus simplement en maîtrisant leur consommation : lorsqu'on sait qu'environ 50 % de la production agricole alimentaire est perdue ou jetée, la perte des sols apparaît d'autant plus évitable.

L'homme a multiplié l'érosion par un facteur 100

C'est à peu près le titre d'une étude de mars 2015 publiée dans la revue *Geology*. Cette dernière a fait l'inventaire des pertes de terre et des accumulations de sédiments pour le continent américain au moyen du béryllium-10, traceur cosmogénique naturel de la matière superficielle de l'écorce terrestre. Après l'installation des Européens en Amérique du Nord, en quelques siècles, l'érosion a été 100 fois plus forte qu'elle ne l'était avant sur une durée équivalente ! Les valeurs maximales des taux ont été atteintes à la fin du XIX^e et au début du XX^e siècle. Une partie de cette terre érodée n'est cependant pas parvenue au fond de l'océan, mais a formé sur le continent de nouvelles alluvions et de nouveaux sols.

69. Comment conserver le sol ?

Les zones de bocages se sont raréfiées pour laisser la place, dans de nombreuses régions, à ce qui a pris le nom d'*open field*. Quand un champ est ouvert, il est presque normal que le sol qu'il contient s'en aille ! Cependant, perdre son sol pose problème. Il n'y a probablement pas de processus planétaires plus destructifs que l'érosion des sols. Le phénomène n'est pas récent : Platon, vers - 400 avant J.-C., notait dans son dialogue *L'Atlantide* : « Notre terre est demeurée, par rapport à celle d'avant, comme le squelette d'un corps décharné par la maladie. Les parties molles et grasses de la terre ont coulé tout autour, et il ne reste plus que la carcasse nue de la région. »

Le sol quitte son point de départ par érosion hydrique pour les 2/3, par érosion éolienne pour 1/3 et par érosion anthropique, c'est-à-dire à coup de lourds camions, enfin de manière variable selon les états. Chacune de ces pertes, en un lieu donné, appelle, pour les limiter, des techniques et pratiques agricoles totalement différentes. Mais il existe une technique commune à tous les sols : l'utilisation de couvertures végétales vivantes, ou simplement de mulch ou paillis (couverture par les résidus végétaux). Mais il n'est pas possible de maintenir en permanence des couvertures végétales, car il faut bien, de temps à autres, gratter la terre, pour semer ou planter.

Pour lutter contre l'érosion hydrique, en gros, il faut agir pour faire entrer l'eau dans le sol et non la faire courir sur les sols, qu'elle éroderait ! L'établissement de terrasses est la pratique ancestrale universelle qui, *de facto*, revient à faire de l'agriculture selon les courbes de niveau. Pour pouvoir pratiquer la riziculture inondée dans des pentes, les terrasses sont les seules pratiques possibles, et nombreuses sont celles qui ont résisté des siècles !

Forte de cette observation, la première recommandation consiste à affirmer que les pratiques agricoles doivent être conduites selon les courbes de niveau. Néanmoins, cette recommandation est délicate à appliquer avec des engins de grande largeur qui ne veulent pas verser !

Un autre moyen astucieux de faire pénétrer l'eau dans le sol pour éviter son ruissellement est de stocker temporairement l'excédent de pluie quand le sol est saturé. Dans la Chine des loëss, très fragiles, des réservoirs ou fossés au bas des parcelles gardent l'eau, qui de plus peut être réutilisée en irrigation à la période sèche.

Les barrières de végétaux, c'est-à-dire les haies, sont d'une efficacité prouvée. Mais la tendance est à leur suppression car on les considère comme des obstacles à la pratique de l'agriculture en très grande surface. Des bandes enherbées sont aussi un moyen très efficace de rétention des particules les plus fines lorsque les flux d'eau sont limités. L'ensemble des pratiques d'agriculture de conservation avec des systèmes sans labour, ou sous couverts végétaux, ou bien des pratiques de *strip till* qui préservent au moins 30 % des résidus de culture en surface, permet de limiter considérablement les érosions hydrique et éolienne.

L'évasion d'un sol cultivé par érosion est un phénomène attendu ; elle a conduit aux paysages qui nous entourent. Cette perte ne peut jamais être considérée comme bénéfique. Néanmoins, des observations faites sur les parcelles agricoles autorisent certains à penser qu'il serait possible de tolérer une certaine perte par érosion sans mettre en péril la fertilité des

Planifier l'aménagement pour conserver les sols

Pour conserver le sol, il faut ni l'enlever ni le couvrir, car bulldozers, scrapers et autres machines de fort tonnage déplacent en fait beaucoup de sols. Entre 1982 et 2003, un peu plus de 1 300 000 ha de terres agricoles ont été artificialisés en France et ce sont souvent les meilleures terres agricoles, périurbaines, qui sont perdues.

Une partie de ces surfaces retirées à la production végétale est imperméabilisée, ce qui leur confisque les fonctions de filtre et de réservoir pour l'eau. La qualité des sols et les études pédologiques devraient de toute évidence être prises en compte à chaque projet d'aménagement, mais ce n'est toujours pas le cas. Dans ce domaine, les records du moment sont détenus par la Chine, qui construit des villes nouvelles en chaîne. En 2010, on y comptait 94 villes de plus de 1 million d'habitants ; elle en totalisera 143 en 2025. Et, dans le Grand Ouest vers Lanzhou (province du Gansu), 600 sommets vont être rasés pour créer des villes de 25 km² ! Chaque jour, 100 000 m³ de loess sont déplacés.

sols. Aux États-Unis, cette valeur serait au maximum de 11 t de terre par hectare et par an. En toute logique pédologique, et dans une perspective de développement durable, la limite tolérable en un lieu donné ne devrait pas être supérieure à la quantité de sol formée par altération des roches mères en ce lieu durant la même période !

On estime que la formation des sols, en France, se situerait entre 200 kg et 1 tonne de terre par hectare et par an. La lutte contre toute érosion des sols est à l'évidence une priorité, quel que soit le pays, car les sols resteront encore longtemps le point de départ de nos productions alimentaires. Elle est même encore plus prioritaire dans les pays où l'urbanisation ronge les terres à vitesse croissante. Cette lutte impose aux agriculteurs, gestionnaires de facto des sols et des services écologiques qu'ils nous fournissent, des contraintes qui doivent aboutir à utiliser toute une série de pratiques agricoles le moins agressives possible à l'égard des terres, tout en favorisant la durabilité de productions agricoles.

70. Radioactif, le sol ?

Tout sol contient naturellement des isotopes radioactifs de quelques éléments chimiques bien particuliers, et il en est ainsi depuis que la Terre existe. La radioactivité naturelle a même été très prisée à l'époque de sa

découverte : les producteurs d'eaux minérales vantaient leur teneur en radium, idéal pour soigner toutes sortes de maux. Les temps ont bien changé ! Aux isotopes naturels s'ajoutent, depuis plus de soixante ans maintenant, d'autres isotopes radioactifs que l'on ne trouve pas dans la nature, émis dans l'environnement par l'industrie nucléaire civile ou militaire.

Les isotopes radioactifs sont des atomes instables qui se désintègrent en émettant soit des rayonnements, comme les rayons X et gamma, soit des particules alpha, bêta ou neutrons. Il reste alors un nouvel élément, dit « fils », qui peut être radioactif à son tour, ou stable. Un isotope radioactif est caractérisé par sa demi-vie : le temps nécessaire pour qu'il en reste la moitié, et l'on compte la radioactivité en becquerels (Bq), ce qui correspond à une désintégration par seconde. Ce nombre de désintégrations étant lui-même proportionnel au nombre d'atomes, le Bq est aussi une expression de quantité de l'isotope en question.

Les isotopes radioactifs naturels ont deux origines principales. La première est la matière primordiale du système solaire : si la durée de vie de l'isotope est du même ordre que l'âge du système solaire (milliards d'années), il en reste encore. C'est le cas de l'uranium-238, du thorium-232 et du potassium-40. S'y ajoutent leurs éléments fils. La seconde origine est le bombardement de la matière par des rayonnements cosmiques provenant du soleil ou d'étoiles lointaines. C'est notre atmosphère qui est la première cible, et des isotopes comme le carbone-14 ou le béryllium-10 y sont formés. Dans les sols, les premiers arrivent par le bas, depuis les roches, et les seconds par le haut *via* l'atmosphère et des pluies.

Il faut savoir aussi que l'industrie minière, en exploitant ou en pulvérisant toutes sortes de roches qui ont concentré des métaux, a remonté à la surface plus de radioactivité qu'il n'y en avait autrefois. On parle de radioactivité naturelle « augmentée ».

L'uranium est surtout présent dans toutes les roches cristallines de type granite. C'est pourquoi, en France, il est particulièrement abondant dans le Massif central, en Bretagne et dans les Vosges. Plus que l'uranium, c'est son petit-fils le radon-222, formé *via* le radium-226, qui pose des problèmes de santé. Ce gaz s'échappe du sol. Il est chimiquement inerte ; nous ne le fixons donc pas mais, quand nous l'inhalons, ses particules alpha nous irradient. Il existe des politiques d'évitement, par exemple fondées sur l'isolation et la ventilation des pièces en rez-de-chaussée.

On trouve un autre isotope beaucoup plus largement distribué dans nos sols que les précédents : le potassium-40, l'isotope radioactif naturel du

potassium. Il provient aussi de la matière primordiale de notre système solaire. Cet isotope est présent à 0,012 % dans le potassium naturel. Ainsi, nos terres, qui contiennent en moyenne 3 % de potassium, recèlent en moyenne 1 000 Bq de potassium-40 par kg. C'est notre propre potassium qui nous irradie le plus. Notre stock interne de potassium-40 est de l'ordre de 4 000 Bq. Comme c'est un élément indispensable et qu'il est indissociable du potassium stable, nous ne pouvons pas y échapper, et il en est de même du carbone-14. Tout juste les buveurs de vin seront-ils un peu plus radioactifs que les buveurs d'eau, car le raisin est assez riche en potassium.

Les isotopes radioactifs pour la recherche en science du sol

Depuis la découverte de la radioactivité, les applications scientifiques se sont multipliées. En matière de sols, en voici quelques-unes. Les émissions naturelles de radioactivité provenant d'isotopes radioactifs tels l'uranium, le thorium et le potassium peuvent être mesurées précisément par des moyens aéroportés, et utilisées pour mesurer les concentrations de ces éléments dans les sols et, indirectement, dessiner les cartes de sols. Cette technique est d'utilisation courante dans les pays neufs, comme l'Australie. Mais elle se développe aussi en Europe, en complément d'approches plus traditionnelles. Comme la concentration en isotopes radioactifs diminue avec le temps, certains servent aussi de chronomètres, par exemple pour dater les roches. Le carbone-14 (^{14}C) est particulièrement utilisé. Il est fabriqué sans cesse dans l'atmosphère, se combine à l'oxygène sous forme de $^{14}\text{CO}_2$, puis est intégré aux composés organiques végétaux par la photosynthèse. Dès ce moment, la proportion de ^{14}C dans le carbone diminue et sa mesure permet de dater le temps écoulé depuis. C'est ainsi qu'on date à peu près tout ce qui est organique, jusqu'à 60 000 ans : du charbon de bois aux tissus en passant par les restes animaux et... les matières organiques du sol. Le développement de cet outil extraordinaire a valu le prix Nobel à W.F. Libby en 1960.

Lorsque les rayonnements cosmiques atteignent le sol, ils provoquent en particulier la production du béryllium-10, en quantité très faible mais mesurable avec de gros accélérateurs. La quantité de cet isotope permet de quantifier le temps depuis lequel le matériau du sol est exposé à la surface, et aussi les vitesses d'érosion. Enfin, les polluants émis par les essais de bombe H en 1955-1964, notamment le tritium (^3H), le carbone-14 et le césium-137, ont permis de tracer des vitesses de transferts de l'eau, du cycle du carbone, ou des vitesses d'érosion.

Quid de la radioactivité artificielle ?

On trouve, d'abord à la surface des sols, ensuite à l'intérieur, nombre d'isotopes radioactifs créés ou concentrés par l'homme du fait des activités nucléaires. À l'échelle globale, l'essentiel de ces radio-isotopes a pour origine, d'une part les retombées des explosions nucléaires militaires pratiquées en atmosphère dans les années 1955-1964, d'autre part les effluents des centrales de production électrique. Aux échelles locales, les accidents comme ceux de Three Mile Island, Tchernobyl ou Fukushima ont contaminé la terre alentour pour des siècles. Les radio-isotopes les plus marquants de toutes ces émissions sont ceux du carbone (^{14}C : 5 730 ans), de l'hydrogène (^3H : 12 ans), de l'iode (^{131}I : 8 jours), du césium (^{134}Cs : 2 ans ; ^{137}Cs : 30 ans), du strontium (^{90}Sr : 29 ans).

Les accidents de Tchernobyl et de Fukushima ont même répandu du plutonium, qui est dans les sols pour des dizaines de milliers d'années. Toutes ces contaminations radioactives se caractérisent par leur concentration première dans le sol, puis leur transfert progressif aux végétaux et aux eaux. Une contamination des sols, préoccupante également, est due aux déchets de l'exploitation minière passée ou présente de l'uranium, qui ont été épandus en surface, déchets dits « stériles » en langage minier, mais contenant encore de l'uranium et de nombreux isotopes fils.

71. Pourquoi le sol de la forêt amazonienne est-il si fragile ?

C'est un beau paradoxe : ces écosystèmes dont la production végétale est parmi les plus élevées du monde, et aux records de richesse en termes de biodiversité, ont les sols parmi les plus pauvres de la planète. En effet, en raison d'une part du climat chaud et pluvieux et d'autre part de l'absence de mouvement de l'écorce terrestre à ces endroits, les boucliers amazonien et africain sont soumis depuis des millions d'années à une altération intense et continue, qui n'a laissé des roches initiales que des résidus de quartz et les produits ultimes de l'oxydation de leurs minéraux : des oxydes de fer, d'aluminium (d'où le nom de ferralsols) et de l'argile kaolinite sur une grande épaisseur. Les réserves d'éléments nutritifs de la roche initiale, indispensables, comme le potassium, le calcium, le magnésium, le phosphore ont presque complètement disparu.

La réussite de ces écosystèmes vient de leur capacité à utiliser sans perte ces éléments nutritifs, par un recyclage à flux tendu entre la chute continue des feuilles, la biodégradation des litières forestières et la récupération des

éléments. Les minéraux de ces sols ont d'ailleurs une capacité très faible à retenir les ions nutritifs ; la fine couche de matière organique de surface joue ce rôle. Les communautés végétales, animales et microbiennes, dans ce climat très constant, ont eu le temps de s'adapter à une récupération très efficace. Mais, pour les mêmes raisons, ces grands et beaux écosystèmes sont extrêmement fragiles. Le système s'arrête dès que l'on exporte des éléments nutritifs, pour le bois ou l'alimentation par exemple. Les agricultures traditionnelles sur brûlis le savent bien : l'exploitation ne doit durer que quelques années, puis doit se déplacer pour permettre à la forêt de régénérer le cycle. La vitesse de la perte des matières organiques, due à la température, à l'humidité et à la nature minéralogique, contribue également à cette fragilité. La vitesse de biodégradation est 10 fois plus rapide qu'en France ou qu'au Canada, par exemple. Alors que, dans les zones tempérées, la réserve organique permet d'éponger une perturbation en continuant à fournir des éléments minéraux pendant plusieurs dizaines d'années, l'écosystème ou l'agrosystème amazonien ne résistera que quelques années à la même perturbation, avec le risque que l'érosion prenne le dessus car le sol sera très appauvri en matières organiques. Cette différence de température et de sol explique la fragilité des agrosystèmes et écosystèmes des pays du Sud par rapport à ceux du Nord, malgré un climat apparemment plus propice.

72. L'acidité des sols réduit-elle la biodiversité ?

Si l'on cherche à expliquer l'extraordinaire variété de la couverture végétale sur Terre, la première raison est évidemment climatique, car disponibilité de l'eau et température sélectionnent d'emblée les plantes en fonction de leur physiologie. L'acidité des sols joue ensuite un rôle prédominant. Soit directement, car nombre d'espèces sont empoisonnées par l'aluminium soluble présent dans les sols acides, ou au contraire s'y sont adaptées, et nombre d'autres ne supportent pas la présence de calcaire dans les sols alcalins. Soit indirectement, car la nutrition azotée et calcique n'est pas optimale dans les sols très acides, tandis que la disponibilité en phosphore et en fer est faible en sol alcalin.

Cette limitation, les animaux la ressentent à travers ce qu'ils ingèrent. Ainsi, les escargots ne peuvent former leurs coquilles en sols très acides et les mésanges doivent user de stratagèmes élaborés, comme le vol de fragments de coquilles dans des élevages de poules, pour trouver le calcium nécessaire aux coquilles de leurs propres œufs. Depuis le début de

l'agriculture, l'homme contourne cet obstacle en sélectionnant des plantes adaptées aux sols qu'il cultive. Seigle et maïs supportent l'acidité, tandis que blé et luzerne y croissent mal mais s'accommodent bien des sols calcaires. Et, depuis plus de deux mille ans, l'homme corrige l'acidité naturelle des sols (voir question 5 et question 7) en leur apportant du calcaire ou de la marne, et en supplémentant les animaux d'élevage comme les poules. Partout où les terres sont cultivées, les sols ne sont pas ou plus acides. En forêt, sauf sur quelques massifs calcaires et en climat sec, les sols sont acides, voire très acides. Ce faisant, l'homme a ouvert de nouveaux espaces à de nombreuses espèces, et restreint les aires de répartition de beaucoup d'autres.

De manière générale, dès qu'il pleut suffisamment, les sols s'acidifient, réaction qui croît avec le volume des précipitations. L'agriculture accélère leur acidification d'autant plus qu'on récolte des parties riches en calcium, magnésium et potassium et qu'on apporte des engrais azotés ammoniacaux. De nombreuses régions intertropicales ont ainsi perdu leurs maigres et précieuses réserves de Ca, Mg et K en les exportant vers les pays du Nord ou vers leurs grandes villes sous forme de récoltes. Le pH du sol peut ainsi baisser d'une unité en quelques décennies. Si, d'autre part, les sols reçoivent des pluies riches en composés azotés et acides, celles-ci provoquent une acidification des horizons profonds. Ce phénomène a provoqué des carences en magnésium des arbres, l'un des symptômes du dépérissement forestier du centre et de l'est de l'Europe qui a alarmé l'opinion au cours des années 1980.

Si sols et sous-sols sont pauvres en minéraux altérables, les eaux de source et de ruisseaux peuvent petit à petit s'acidifier. C'est ce qui s'est passé dans les pays scandinaves, mais aussi dans les forêts du massif vosgien, sur les roches les plus pauvres, grès et granites. Ces eaux acides ont rendu le plomb des canalisations soluble et provoqué une épidémie de saturnisme. Dans les ruisseaux, l'acidité et la présence d'aluminium ionique ont causé la raréfaction des invertébrés décomposeurs des feuilles mortes, comme les porte-bois, et la disparition des truites. En Suède et en Allemagne, où ces syndromes ont été vécus comme des drames nationaux, on chaulé les sols forestiers les plus acides, et cette opération modifie la composition botanique des sous-bois.

L'épicéa acidifie les sols

Les terres agricoles abandonnées au cours du xx^e siècle ont été massivement plantées en résineux, souvent en épicéa en raison de sa croissance rapide. Au cours des années 1970, forestiers et naturalistes constatent que la biodiversité des sous-bois a chuté et que des humus acides épais se sont formés. Les recherches confirment que les aiguilles d'épicéa favorisent cette formation d'humus acides et se décomposent lentement. Mais elles révèlent surtout que l'acidité des pluies mesurée sous les plantations d'épicéa est environ deux fois plus élevée que sous feuillus car les feuillages sempervirents filtrent les poussières et brouillards acides pendant l'hiver. La forte baisse de la pollution atmosphérique acide depuis les années 1980 a beaucoup réduit l'acidité des apports, mais les récoltes intensives de bois-énergie ont pris le relais et sont actuellement la première source d'acidification de sols forestiers sur roches pauvres.

73. Les sols sont-ils sédentaires ?

Loess, moraines, sédiments, dépôts de pente colluvionnaires et matières organiques accumulées : ces noms sont ceux de formations pédologiques sédimentaires qui ont toutes pour origine le transport et le transfert de matériaux issus de l'altération de la roche mère, voire de sols constitués ailleurs. Les « véhicules » utilisés dépendent des lieux et des modes de production des altérations. Il peut s'agir de glaciers, d'eaux torrentielles ou fluviales et des vents. Tous ces véhicules ont pour « moteur » commun universel la gravité.

Dès qu'une roche mère située sur une pente est altérée par la combinaison des différentes forces climatiques (pluie, chaleur), voire couplée à des attaques chimiques dues au développement de la végétation, les matériaux grossiers formés vont naturellement descendre la pente de toute croupe primitive. Ces dépôts de pentes, des colluvions, forment des amas qui doivent être considérés comme représentatifs de la lithologie des roches mères. Selon leurs sites de formation, ces dépôts seront repris soit par des glaciers, soit par des torrents et fleuves, soit quelquefois, mais rarement à ce niveau, par des vents. C'est ainsi que des altérites descendent lentement les pentes soit en chevauchant des glaciers qui ont pu recevoir des cailloux colluvionnaires, soit en étant incluses dans les glaciers qui érodent les roches mères, quelles qu'elles soient, sur lesquelles elles glissent sous l'effet

de leur poids. Tous les matériaux ainsi véhiculés se déposeront sous forme de moraines dans les zones de fonte des glaciers ; et tous nos paysages montagnards recèlent des moraines plus ou moins recouvertes de plus ou moins de végétation en fonction de leur ancienneté et leur orientation.

Les éléments grossiers présents dans les moraines seront repris, véhiculés, exploités, brisés, par les eaux des torrents puis des fleuves. Ils s'accumuleront tout au long des plaines alluviales ou bien achèveront leur course dans des lacs et/ou dans des océans, avec une finesse de granulométrie très inférieure à celle de départ. Ces éléments altérés sont ainsi devenus des sédiments dont le destin est fonction de leur zone d'échouage.

Les sédiments sont donc des ensembles de particules en suspension dans la glace, l'eau ou l'atmosphère. Ils finiront par se déposer, souvent en couches successives, dans les mers et océans si le véhicule emprunté est l'eau, et sur terre si le véhicule est le vent. En bord de mer, les matériaux grossiers puis les sédiments naissent des agressions des vagues sur les rochers ou les coraux. Dans tous les cas, la consolidation de ces dépôts lacustres, marins ou terrestres, aboutit à la formation des roches et terrains sédimentaires.

En conclusion, de très nombreux horizons de surface des sols que nous exploitons, ou bien des sols sur lesquels nous faisons du tourisme pédestre, sont constitués de particules venues d'ailleurs. Les sols résultant directement de l'altération de la roche sous-jacente sont *in fine* assez peu nombreux.

Chapitre 5

Les métamorphoses du sol

74. Qui incarne la fertilité des sols ?

Les termes « fertiles » et « fertilité » sont peut-être, parmi la multitude des mots de la langue française, ceux qui illustrent le mieux l'évolution des croyances et des progrès des connaissances au cours des siècles.

Chacun d'entre nous dispose de représentations de sols fertiles traduisant notre relation à la terre. Les céréales sont de longue date la base de l'alimentation humaine. C'est pourquoi il est très fréquent que la première des représentations d'un sol fertile qui vienne à l'esprit soit un beau champ de blés blonds, presque à maturité, ondulant sous une brise délicate. Ce peut être également une prairie verte, bien grasse, dans laquelle paîtraient de surcroît des vaches aux cornes élégantes et aux pis bien gonflés, ou encore, dans une autre région, une oasis luxuriante. En fait, le terme « sol fertile » réveille dans notre inconscient collectif l'image du jardin d'Eden où « du sol poussèrent des arbres de toutes espèces, agréables à voir et bons à manger » (Genèse, 1-2)... ce qui nous a valu, par la suite, pas mal de soucis, et nous a conduit en particulier à sentir « la sueur sur notre visage » (Genèse, 3) !

Par son origine grecque, devenue latine, le terme « fertilité » signifie : qui porte l'abondance (du verbe latin *fero, fers, fere, tuli, latum*). Les Grecs polythéistes vénéraient, à côté de bien d'autres dieux, Déméter, simultanément déesse des moissons et de la fécondité. Un peu plus tard, les Romains la nommaient Cérès et lui donnaient les mêmes attributs. Ces ancêtres romains parlaient aussi, pour décrire ces zones où tout semblait pousser, de *loci laetitia* (lieu de joie). Les uns et les autres n'avaient pas oublié d'y associer un dieu quelque peu fêtard, celui de la vigne et du vin, Dionysos chez les Grecs et Bacchus chez les Latins. Ainsi, il y a bien des millénaires que le pain et le vin sont deux mamelles essentielles de notre existence, au moins notre existence ludique !

75. Comment fabrique-t-on les maisons de terre ?

En traversant la France, que de façades différentes ! Grattons le crépi s'il existe, on découvre des pierres, du bois, de la brique ou de la terre. La disponibilité locale de matériaux de construction est la première raison de cette variété. Dans les grandes plaines couvertes de limon, sur les plateaux marneux où la pierre se débite mal ou en petits fragments, sur les grandes terrasses fluviales riches en cailloutis, l'usage de la pierre est malcommode.

On construit en terre crue quand on est pauvre, que les moyens de cuisson, bois ou charbon, ne sont pas disponibles, mais que le soleil sèche suffisamment, au moins pendant la construction. Ensuite le toit protège le bâtiment.

Le matériau est sous nos pieds, il suffit de creuser. Presque toutes les terres s'y prêtent pourvu que l'on applique la bonne technique. Si la terre contient en proportion équilibrée du sable, des cailloutis et de l'argile, on peut construire en pisé, c'est-à-dire en compactant fortement la terre humide dans des coffrages, que l'on déplace vers le haut du mur au fur et à mesure qu'il s'élève. C'est alors un béton de terre que l'on forme ! Sa solidité tient à sa très forte densité, résultant de l'assemblage très compact de particules de tailles différentes. Entre ces particules, un fin film d'eau assure la liaison, à la manière dont l'eau est retenue dans un capillaire. Si la texture est limoneuse, il faut ajouter de la colle et un structurant pour former la bauge ou le torchis.

La colle, c'est l'argile lorsque le sol en contient, pourvu qu'il n'y ait pas trop, sinon elle va se fendiller et se déliter au séchage. On va rechercher l'argile dans les horizons argileux des sols, où elle peut s'accumuler,

ou en profondeur, lorsque la désagrégation du matériau géologique en produit, comme souvent sur les marnes et calcaires. Trop de sable n'est pas souhaitable, mais il suffit de peu d'argile pour bien coller entre eux des grains de sable ou des graviers. La colle, c'est souvent aussi des excréments animaux, des bouses que l'on mêle à de la paille ou des fibres végétales pour donner de la structure, lier les éléments, faciliter le séchage. Plus le sol est argileux, plus la fibre est nécessaire. Cette boue fibrée séchera en place (technique de la bauge) ou emprisonnée dans un treillis de branchettes (torchis ou colombage). Vous aurez ainsi des murs-sols qui respirent, mais isolent, du froid comme du chaud.

La brique est plus exigeante, qu'elle soit de terre crue (adobe) ou cuite (brique dite mécanique). Il faut une texture argileuse, et surtout une grande homogénéité, pas de cailloux. Pour cela, il faut broyer et/ou tamiser le matériau argileux extrait du sol, le fouler pour en faire une boue homogène que l'on laisse reposer, pourrir, avant de la mouler et de la faire sécher. Dans les pays chauds, une saison sèche peut suffire. Ainsi, du bon usage des sols on peut tirer à la fois les récoltes et les murs des greniers. Ces techniques, on les connaît depuis la plus haute Antiquité : les plus vieilles constructions en pisé auraient 11 000 ans ; elles accompagnent la sédentarisation des hommes, les débuts de l'agriculture. Et quel succès ! Le tiers de la planète vit actuellement dans des maisons de terre. Les plus anciens gratte-ciel du monde, au Yémen, hauts d'une trentaine de mètres, sont construits en terre crue. Et de nombreuses pyramides, en Mésopotamie, en Chine, au Pérou sont faites de briques séchées.

Née dans le Croissant fertile, c'est par l'Afrique, à travers la Méditerranée puis l'Espagne, que la terre crue s'épanouit en France. Les différentes techniques se calquent sur la composition régionale des sols et les cultures artisanales : pisé sur les terrasses alluviales du Dauphiné et du Lyonnais, bauge sur les arènes sableuses de Bretagne et de Vendée, torchis et colombage sur les limons du Nord, adobe dans le Sud-Ouest, la région toulousaine. Loin d'être dépassé, ce mode de construction en terre préfigure l'architecture du futur, malléable, économe en énergie, éternellement recyclable. Le CRAterre, de l'École nationale d'architecture de Grenoble, en a fait sa spécialité, internationalement reconnue.

76. Existe-t-il des sols vierges ?

Au cours des derniers siècles, l'emprise de l'homme sur la planète Terre – son empreinte écologique – s'est considérablement étendue et amplifiée.

Agriculture intensive, drainage des zones humides, exploitations minières et industrielles, extension des zones urbanisées... Pour comprendre la formation naturelle des sols, leurs propriétés, et ainsi mesurer à quel point l'homme a pu les changer, la tentation normale est de rechercher les espaces où l'homme n'aurait pas, ou aurait le moins modifié le sol. L'espace forestier, parce qu'il évolue au rythme lent des éclaircies et coupes qui rythment la révolution forestière et que l'intensité des pressions qu'il reçoit est faible au regard des autres usages des terres, apparaît comme relativement protégé, donc plus propice à la conservation de sols vierges, s'ils existent. La question se ramène alors, peu ou prou, à la suivante : où sont nos forêts vierges ou au moins nos forêts « de toujours » ?

Nous savons déjà qu'au début du XIX^e siècle, la surface forestière française était de 7 millions d'hectares, c'est-à-dire la moitié de ce qu'elle est actuellement. Autrement dit, lorsque l'on regarde une forêt en France, on a une chance sur deux de regarder un ancien champ, une ancienne prairie... Les plus anciens documents cartographiques précis datent du XVIII^e siècle et indiquent où se trouvaient les forêts d'alors : majoritairement dans l'est de la France. Dans tout l'Ouest et le Centre, les forêts sont alors rares voire absentes. Quant aux forêts anciennes, les recherches archéologiques récentes montrent qu'elles ont souvent été cultivées à des époques antérieures, au cours du Moyen Âge, et/ou de la période gallo-romaine, ou encore antérieurement, parfois dès l'âge de bronze, c'est-à-dire près d'un millénaire avant notre ère. On y trouve des ruines enfouies sous la litière forestière, des tas d'épierrement, des vestiges de murs, de voies empierrées, de terrasses agricoles, de tombes...

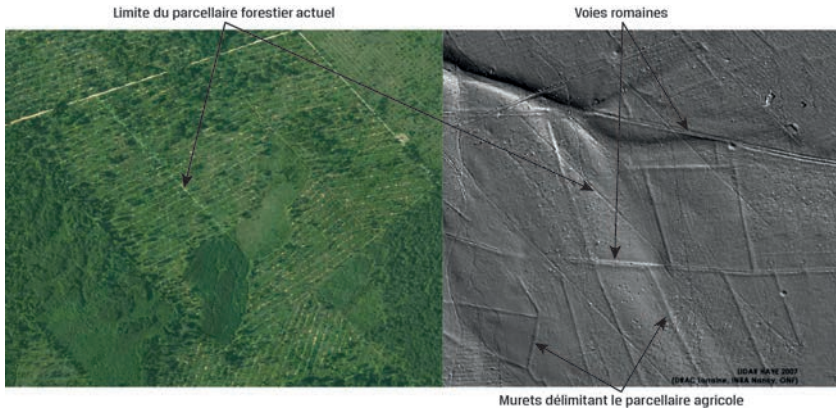
Sols argileux, sableux, limoneux, acides, calcaires, pentes faibles ou fortes, en Europe, il semble que l'agriculteur, à un moment ou un autre au cours de périodes où la population croît plus vite que les rendements, ait mis, pour une durée plus ou moins longue, tous les espaces en valeur.

Et en Amazonie ? Là encore, plus on cherche et plus on découvre sous la forêt « vierge », des tessons de poterie épars dans les chablis, des levées de terre... marquant les traces d'une agriculture ancienne. Mal datée encore, mais certaine.

Où que l'on soit, l'agriculteur s'établit de manière durable sur un espace qu'il défriche et dont il enrichit les sols par ses déjections, celles de ses animaux, les cendres des feux qu'il pratique. Cet enrichissement se fait généralement aux dépens des zones périphériques (qui peuvent être les rivages de fleuves ou d'océans) dont ses animaux et lui-même vont tirer une partie de

leur subsistance. L'agriculture produit donc partout des espaces appauvris, et d'autres enrichis en éléments fertiles. En éliminant la couverture forestière, elle favorise l'érosion des sols, c'est-à-dire leur amincissement en haut des pentes et leur épaissement dans les bas-fonds. Des lambeaux forestiers reliques de Bretagne aux forêts réputées impénétrables de Guyane, on retrouve les mêmes symptômes, sols foncés car enrichis en fragments de charbon, sols enrichis en phosphore et en azote assimilable par les plantes.

Où donc chercher nos références de sols originels ? En acceptant le relatif. Les sols forestiers, plus vierges assurément que nos sols de grande culture appauvris en matière organique et gavés d'engrais minéraux, plus vierges aussi que nos sols urbains encombrés d'inertes, nous offrent les points de départ de grandes transformations en cours. En considérant aussi que, par nature, les sols n'arrêtent jamais d'évoluer, et que ces voies et processus d'évolution sont plus passionnants que la recherche illusoire d'une virginité intemporelle.



À gauche, photo aérienne de la forêt domaniale de Haye (Meurthe-et-Moselle).
 À droite, parcellaire agricole d'époque gallo-romaine sur le même domaine, révélé par la technique du Lidar aéroporté.

77. La terre porte-t-elle des verres ?

Un souvenir d'abord. Sur les flancs forestiers d'une colline vosgienne, une après-midi pluvieuse, émergeant d'entre les mousses, quelques blocs de grès couverts d'un glacis translucide et bulleux, vert, minéral. Du verre ! Et l'idée joyeuse que des hommes ont jadis coulé ici les récipients d'une libation boisée à des dieux salvateurs.

Produire du verre, rien n'est plus naturel. La légende rapportée par Pline est limpide : des marins phéniciens négociants en natron, relâchant un soir sur une plage de sable, auraient utilisé des briques de natron pour caler leur foyer. Sous l'effet du feu, sable et natron fondent puis se figent en une coulée vitreuse. Quarante-cinq siècles plus tard, des étudiants américains déterrent des poupées de verre sous les pylônes électriques au milieu du désert : sous l'impact des éclairs, le sol fond puis se fige en éclats de verre nommés « fulgurites ».

Tout est affaire de chaleur et de composition. Les verres naturels, telles les obsidiennes, proviennent du refroidissement rapide de magma rocheux dont la composition est proche de celle des granites. Pour leur couleur sombre, leur aspect lisse et brillant ou leur cassure coupante, l'homme les recherches dès les prémices de la civilisation afin d'en faire des outils ou des armes. Les premiers verres produits par l'homme, il y a plus de cinq mille ans, sont opaques. L'adjonction à du sable siliceux de terres et de cendres alcalines abaisse la température de fusion. Soumis au feu, le mélange se liquéfie, mais, lors de son refroidissement, les composants ne se séparent pas, pas plus que l'ensemble ne recristallise. Il se forme un liquide-solide, amorphe, coloré en fonction de la nature des composants. Dès l'invention du verre, les artisans apprennent les pigments et miment les pierres précieuses. Plus lentement, ils comprennent le secret des verres transparents : une très grande pureté des sables siliceux et l'adjonction de fondants alcalins et de manganèse, le « savon » des verriers.

En raison de leur richesse en silice, de leur surface lisse et de leur structure non cristalline, les verres naturels sont imperméables, presque inertes, voire inusables. En effet, la dissolution des minéraux et des roches se fait prioritairement au contact entre minéraux de composition différente, ou dans les plans de clivage des roches. D'autre part, leur composition les rend peu sensibles à l'acidité ou à l'alcalinité des solutions. De sorte que leur dissolution est très lente. Sous forme d'émail, qui n'est autre qu'une glaçure de verre superficielle, cette propriété formidable est utilisée depuis la très haute Antiquité par les potiers pour imperméabiliser les pots ou pour couvrir les bas-reliefs.

Issues du même refroidissement rapide de matière en fusion, les poussières de lave émises par les volcans ont aussi une structure vitreuse, mais pleine de bulles. Leur très grande surface spécifique les rend *a contrario* très sensibles à la dissolution, et d'autant plus que les laves sont généralement pauvres en silice et riches en aluminium. Leur dissolution va libérer

leurs éléments constitutifs rapidement, lesquels précipitent sous forme de gels, non cristallins, très hydratés. Parmi ceux-ci, l'aluminium va jouer un rôle important car cet élément se lie très fortement à la matière organique. Liaison à double sens : la matière organique sera préservée de la biodégradation par sa liaison avec l'aluminium, et la matière organique inhibera la cristallisation de l'aluminium en oxyde, ou, avec la silice, en argile. Cette relation si particulière donnera naissance à des andosols, très sombres, aux propriétés invraisemblables. Dans ces sols formés à partir de cendres volcaniques s'accumulent à la fois d'énormes quantités de matière organique et des gels d'aluminium et de silice. Il en résulte une porosité considérable, autorisant le stockage mais aussi le drainage de pluies diluviennes sans que la structure s'effondre, et des propriétés agronomiques merveilleuses (forte capacité de stockage des nutriments cationiques, mais souvent aussi anioniques). Ces sols figurent parmi les plus riches de la planète et ont nourri les plus fortes densités de population.

Mieux, on peut faire du verre en se passant de feu ! Des mécanismes biologiques permettent l'introduction, dans le sol, de composés amorphes de même composition que les verres. Car la silice présente dans l'eau des sols en faible teneur est absorbée par les plantes et concentrée petit à petit dans leurs extrémités, où elle précipite sous forme vitreuse, en opale, constituée de silice hydratée amorphe. Cette même opale précipite dans les nappes phréatiques baignant des sables lorsqu'elles s'évaporent et s'épuisent. À la mort des feuilles, cette dentelle de verre qui mime leurs extrémités ou les contours de leurs cellules retombe au sol et se conserve. Ces fossiles de verre, les phytolithes, permettent de connaître les végétaux qui ont accompagné la formation des niveaux de sols ou de sédiments anciens, et leur dissolution, si faible soit elle, renseigne sur les climats qui ont prévalu depuis leur formation.

78. Quels sont les secrets du pot de terre ?

Nous en avons tous l'expérience, la terre humide colle ! Elle durcit quand elle sèche, et parfois se fendille. Cette plasticité tient à sa teneur en argile, qui conditionne sa capacité à retenir de l'eau. L'argile, c'est d'abord une question de taille : des particules de longueur inférieure à deux millièmes de millimètre. Mais aussi une question de forme : de très fines plaquettes voire des voiles, et donc de très grandes surfaces par unité de masse (voir question 10). Dans un sol, les particules argileuses enveloppent les particules plus grossières (les limons) ou nettement plus grosses (les sables) et jointoient leurs interstices, à la manière d'une colle.

Enfin, c'est une question de charge électrique. Ces feuillets argiles sont en majorité constitués d'un motif de couches de tétraèdres de silice et d'octaèdres d'alumine superposées. Ces couches s'empilent par dizaines ou centaines dans chaque particule argileuse. Dans la structure de ces couches, des substitutions d'un ion par un autre, magnésium à la place de l'aluminium par exemple, créent un déficit de charges positives, c'est-à-dire des charges négatives. Plus ces charges sont nombreuses, plus la particule est chargée négativement, ce qui permet d'attirer et de retenir des ions positifs à sa périphérie. Si des ions de valence élevée, fortement positifs, calcium, magnésium, aluminium sont présents, ces ions vont former des ponts entre les particules argileuses de charge négative, les agglomérer, les flocculer. Plongées dans l'eau, ces argiles ramassées en amas vont sédimenter rapidement et l'eau sera claire. Ces ions jouent en quelque sorte le rôle de « durcisseur » de la colle argileuse. Inversement, en présence d'ions de valence faible (ammonium, sodium, potassium) dans d'eau pure, les particules argileuses négatives se repoussent entre elles et se dispersent dans le liquide, sans sédimenter. La colle ne « prend » pas. L'eau reste trouble et laiteuse.

Entre les particules argileuses, ou entre argiles et autres particules, l'eau-lubrifiant est retenue par capillarité, assurant la plasticité. Lorsque le sol sèche, l'eau est très fortement retenue entre ces particules de faible taille mais de grande surface. Si l'argile est en faible teneur (moins de 30 %) par rapport au sable et au limon, la terre est peu plastique, sèche vite et fendille au droit des discontinuités, là où manque la colle, surtout s'il manque le durcisseur. Car la tension est si forte lors de la dessiccation qu'elle brise les ponts d'argile. À près de 50 % d'argile, la terre est très plastique, et durcit au séchage. Emboutie, montée en colombins, tournée, cette terre argileuse se forme, se modèle, et fournit le matériau rêvé des représentations du monde. Il lui reste à cuire. Petit feu d'abord pour retirer l'eau, puis grand feu pour souder les particules argileuses entre elles. Que se passe-t-il alors ? Tout dépend de la nature du matériau employé, de la technique mise en œuvre et de ce que l'on souhaite obtenir.

La première trouvaille est celle des dégraissants. On peut cuire à basse température (environ 800°) pratiquement n'importe quelle terre (pourvu que la proportion d'argile et son état permettent de constituer une forme). Il faut que, outre l'argile, la terre contienne une proportion de sables de quartz ou de feldspath, ou de calcaire, ou de terre cuite préalablement broyée – la chamotte – régulièrement répartie dans la pâte argileuse, ce qui

évite l'éclatement de la pièce lors de la cuisson. Ce procédé a produit et fournit encore toutes les céramiques de facture grossière. Le produit, dur mais fragile au choc, est poreux. C'est une qualité si l'on veut produire une brique, ou une faïsselle (le ferment lactique se conserve dans la porosité du pot) ou un filtre pour purifier l'eau. Pour l'imperméabiliser, on dépose une fine couche d'argile pure dispersée (la barbotine) sur la céramique. Traditionnellement, on utilise des cendres alcalines, du silicate de soude, de l'eau de pluie, du vinaigre, de l'urine ou des tannins comme dispersant. Et l'on recuit à plus haute température, pour former une couche de verre, un émail, à la surface.

Pour des produits de facture plus fine (céramique sigillée des Romains, porcelaine des Chinois), les céramistes utilisent de l'argile pure qu'ils tirent de gisements sédimentaires, et non de sols, trop variables en composition. La roche extraite est mise à pourrir, c'est-à-dire que l'on laisse les agents atmosphériques (soleil, pluie, gel) disloquer le matériau. L'argile est alors lavée, dispersée, isolée par sédimentation pour atteindre un très grand degré de pureté. La cuisson des pièces, plus technique, nécessite des températures de l'ordre de 950 à 1 000 °C pour des illites, de près de 1 300 °C pour les kaolinites dont on fait les porcelaines. Au cours de la cuisson, les minéraux argileux d'origine disparaissent complètement, et d'autres se forment : plagioclases, spinelles, verres.

Les céramiques techniques actuelles résultent aussi de la fusion chaude de composés non métalliques et non organiques. Les matériaux produits sont réfractaires, durs, résistants, isolants, magnétiques... On en fait par exemple des outils, des isolateurs, des moteurs, des protections, des composants piézoélectriques. Ce sont souvent des oxydes, mais pas nécessairement et ils n'incorporent pas non plus forcément de silice dans leur structure. On s'éloigne du pot de terre... même si la plupart de ces propriétés ont été recherchées et élaborées par les potiers, de l'Antiquité à nos jours.

79. Les sols ont-ils de la mémoire ?

L'archéologie cherche des sites, c'est-à-dire des endroits où l'homme a laissé des traces, plus ou moins anciennes, de son activité passée. Des restes matériels (appelés artefacts), il déduit l'activité, compte les actifs, dessine leur environnement, discute de leur culture, élabore leur société, échafaude son origine, etc. Ces restes sont très divers : éclats de pierre, pointes de flèches, tessons de meules, de poteries, fibules, clous, ruines de bâtiments, de greniers, d'enclos, mares, monnaies, déjections, foyers, laitier, poubelles,

os, dents, cheveux, peaux parfois tatouées, parasites, pollens, ADN (voir question 41)... Les archéologues utilisent la panoplie des analyses et des méthodes que les séries policières mettent en scène dès qu'il s'agit de reconstituer les conditions du crime. Finalement, la différence entre policier et archéologue est mince en apparence, mais fondamentale : pas de crime, ou alors prescription !

Donc pas de déposition, pas de filature, pas de témoin, pas de dénonciation. C'est un monde qui a disparu ! Et rien n'est évident. Depuis 2001, une loi, souvent appliquée, oblige les conducteurs de grands travaux (routes, constructions...) à réaliser des sondages systématiques, dits préventifs. Des pelles mécaniques ouvrent le sol tous les 20 ou 50 m, à la recherche d'artefacts et d'anomalies dans les sols. Empierrements et épierrements, cavités, monticules, chaussées et fossés. Des lasers d'un nouveau type percent la couverture forestière et détectent les parcelles disparues. L'histoire de la France se révèle petit à petit, dense (on compte en moyenne un site au km²), noble et rurale, fascinante de diversité et de continuités.

Dans la palette des métiers rassemblés par l'archéologie, les botanistes ont leur atout : ils savent faire parler les plantes. Car de nombreuses espèces préfèrent les sols des sites archéologiques, ou à l'inverse les délaissent. De sorte que la simple observation de la composition botanique d'un espace peut suggérer la présence ou l'absence de site. Quelques espèces indicatrices de sites archéologiques en forêt sont maintenant bien connues... sans qu'on en comprenne toujours les raisons. Ainsi du groseillier à maquereau (*Ribes uva-crispa*) ou de la petite pervenche (*Vinca minor*). On les trouve à l'emplacement de très nombreuses villas romaines. Est-ce parce que la pervenche est une plante médicinale, dont les propriétés étaient alors déjà connues, et que cette plante se déplace extrêmement lentement ? Est-ce parce que le groseillier apprécie les pierriers et les sols enrichis par les déjections ? Ou bien parce qu'il formait les haies épineuses des enclos à bétail d'antan ?

Inversement, on connaît aussi les espèces ou cortèges d'espèces qui signent les espaces forestiers peu affectés par l'homme. Ainsi, notre muguet du 1^{er} Mai (lorsqu'il ne pousse pas dans nos jardins !) est bien plus fréquent dans les forêts peu perturbées par les activités humaines. Ces distributions d'espèces, auxquelles on ne prêtait qu'une attention distante il y a peu, se révèlent cruciales pour comprendre la biodiversité actuelle. Comme si, pour commémorer les lieux du crime d'oubli, des plantes avaient fleuri.

80. Vers une culture hors sol ?

Au plus profond de la forêt guyanaise, sur les blocs arrondis entre lesquels tourbillonne une rivière, des pétroglyphes représentant des divinités sont gravés. Pour conter ce mythe fondateur de la forêt à leurs enfants, les Amérindiens enduisent ces blocs d'argile rouge, puis les lavent à grande eau. La couleur épouse les creux qu'on discernait à peine, dessinant des personnages qui dansent dans la lumière.

De l'autre côté des Andes, dans le désert péruvien, d'immenses figures représentant les divinités animales des Nazcas sont tracées en retirant les cailloux de couleur foncée qui couvrent les sols gypseux, blancs.

D'immenses espaces sémantiques sont communs aux mots « culture » et « terre ». Cette parenté, cette communauté nourrit nos mythes, nos idéaux, nos civilisations, nos modes d'expression, notre art... Le matériau terre est présent à toutes les étapes de nos civilisations. Pour peindre les parois des grottes fréquentées par l'homme depuis des dizaines de milliers d'années dans toutes les régions de la planète, les chamans utilisent des pigments de terre. Rouge et jaune des oxydes de fer, noir et violet des oxydes de manganèse, blanc d'argiles et de micas, noir des charbons. Ces ornements rupestres, on sait qu'ils sont le pendant d'enduits colorés dont se couvraient les humains dès cette période. Ainsi, la Vénus « impudique » découverte dans l'abri sous roche de Laugerie-Basse, en Dordogne, et datée du Magdalénien révèle des peintures corporelles précises. Parce que les animaux peints ne sont pas ceux que l'on chasse communément à ces périodes, on soupçonne ces peintures d'avoir une signification essentiellement spirituelle.

Parmi les premières transcriptions du langage que nous sachions lire, l'écriture cunéiforme utilise des tablettes d'argile. L'usage du sol par l'agriculture et l'élevage fonde la révolution néolithique et autorise le développement des premières cités. La terre est pétrie, modelée, façonnée en brique, bâtiments et récipients, cuite et enduite. L'argile est utilisée comme parure, onguent, cataplasme interne ou externe. L'homme est de terre : « L'Éternel Dieu forma l'homme de la poussière de la terre... » (Genèse, 2). Parce que nous nous nourrissons des produits de la terre, et qu'à la mort nous y retournons, le sol est notre fondement et notre avenir, dans un espace circulaire. Cette logique alimente maints textes et poèmes.

*La terre cache l'or et montre les moissons ;
Elle met dans le flanc des fuyantes saisons
Le germe des saisons prochaines,
Dans l'azur les oiseaux qui chuchotent : aimons !
Et les sources au fond de l'ombre, et sur les monts
L'immense tremblement des chênes.*

Victor Hugo « La Terre » (*La Légende des siècles*, 1859-1883)

*Heureux ceux qui sont morts car ils sont retournés
Dans la première argile et la première terre.
Heureux ceux qui sont morts dans une juste guerre
Heureux les épis mûrs et les blés moissonnés.*

Charles Péguy, « Ève » (1913)

Le sol fournit aux peintres de nombreux pigments dont ils colorent leurs toiles. Terre de Sienne, brune, formée de goethite, et Sienne brûlée, rouge, composée d'hématite formée par déshydratation de la goethite. Terre verte de Vérone, composée d'argile glauconie et de céladon. Carrières d'ocres de Roussillon (Vaucluse) ou de Bourgogne, ces anciens sols de climat chaud associent glauconie, kaolinite, goethite et hématite pour composer plus de 20 teintes recensées.

Néanmoins, les sols ne semblent pas constituer un sujet en soi pour les peintres. Au cours des années 1960 pourtant, aux États-Unis, le Land Art produit des *earthworks*, littéralement « terrassements ». Des matériaux de la nature, parfois du sol, sont mis en forme à l'extérieur, et, laissés à une évolution naturelle, construisent des paysages improbables. Dans le prolongement de ce mouvement, mais suivant une démarche plus académique, des artistes contemporains comme Herman de Vries, Ousmane Sow et d'autres utilisent la diversité des couleurs ou les propriétés des sols pour construire leurs œuvres.

La chanson contemporaine, elle, moque le sol rural avec humour et poésie :

*Ma famille habite dans le Loir-et-Cher,
Ces gens-là ne font pas de manières.
Ils passent tout l'automne à creuser des sillons,
[...]*

*Ils me disent, ils me disent : [...]
On dirait que ça te gêne de marcher dans la boue,
On dirait que ça te gêne de dîner avec nous.*

Michel Delpech, *Le Loir-et-Cher* (1977)

Ou bien :

*L'année prochaine nous irons
Dans un pays où il fait bon
Et nous oublierons la gadoue
La gadoue, la gadoue, la gadoue.*

Serge Gainsbourg, *La Gadoue* (1967)

Cependant, la terre peut être terrible. Lorsqu'elle s'envole en nuage de poussière, comme lors du *Dust Bowl*, magnifiquement décrit par John Steinbeck dans *Les Raisins de la colère*, et chanté par Woody Guthrie, le sol asphyxie et ensevelit :

*The storm took place at sundown, it lasted through the night
When we looked out next morning, we saw a terrible sight
We saw outside our window where wheat fields they had grown
Was now a rippling ocean of dust the wind had blown.
It covered up our fences, it covered up our barns
It covered up our tractors in this wild and dusty storm
We loaded our jalopies and piled our families in
We rattled down that highway to never come back again.*

Woody Guthrie, *Dust Bowl Ballads* (1940)

La Terre peut engluier et noyer aussi. Plus que l'hiver russe, c'est la boue printanière qui ralentit tout et en particulier les armées. Durant la Seconde Guerre mondiale, l'armée américaine développa un système de classification de la boue, en trois types, suivant sa capacité à soutenir le poids d'un engin militaire. Les exemples de batailles gagnées ou perdues dans – et par – la boue sont légions. Mais le sol dissimule aussi les combattants, dans les tranchées d'Amance, les tunnels du Vietnam...

Dans le sol, s'achève notre corps ; puissent nos écrits nous survivre !

*Mes deux pieds sont tenonnés et mortaisés dans le granit
Je ris de ce que vous appelez dissolution
Et je connais l'amplitude du temps.*

Walt Whitman, « Song of Myself », *Leaves of Grass* (1855)

Post-scriptum

Notre ami Jean-Claude Fardeau nous a quittés au moment où il finissait de rédiger pour cet ouvrage à trois voix, et ne l'aura donc pas vu paraître. Vous reconnaîtrez au fil de ce livre l'agronome, l'expert de l'agriculture française et de nombreuses agricultures du monde, l'homme de terrain autant que le théoricien de la fertilité. Surtout, à travers la verve des propos, vous percevrez aisément ses convictions les plus profondes : celles du scientifique exigeant, empreint de rigueur et pourfendeur des opinions ou des dogmes qui ne seraient étayées ni par la théorie ou l'expérience, ni par le savoir du praticien ; celles de l'homme fidèle, pour qui la terre et l'agriculture sont et doivent rester au service des hommes, ceux qu'elles nourrissent et ceux qui y travaillent, et non pas de ceux qui en tireraient des bénéfices indus ; enfin celle du pédagogue, sincèrement soucieux de transmettre les savoirs au plus grand nombre. Ces textes sont parmi ses derniers écrits, et l'on y perçoit son humour et une certaine prise de hauteur par rapport à la terre et aux terriens. Nous avons nous-mêmes été honorés de partager la rédaction de cet ouvrage avec Jean-Claude. Votre lecture honore sa mémoire.

Jérôme Balesdent et Étienne Dambrine

Bibliographie

L'Association française d'étude des sols, qui rassemble la communauté de langue française des chercheurs et praticiens du sol a un site Internet : www.afes.fr

Annales agronomiques, 1976. Essais de fertilisation de très longue durée. Colloque international, Inra de Grignon du 6 au 8 juillet 1976. Volume 27 n^{os} 5 et 6, p. 483-1094.

Biotope, 2012. Vulnérabilité des milieux aquatiques et de leurs écosystèmes, étude des zones humides. Rapport du ministère de l'Écologie, du Développement durable, de l'Énergie, 144 p.

Collectif Cirad/Inra, 2009. Agricultures et alimentations du monde en 2050 : scénarios et défis pour un développement durable. Note de synthèse, Agrimonde, 34 p.

Arrouays D., Balesdent J., Germon J.-C., Jayet P.-A., Soussana J.-F., Stengel P., 2002. *Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France*, Inra éditions, 332 p.

Aubertot J.N., Barbier J.M., Carpentier A., Gril J.J., Guichard L., Lucas P., Savary S., Savini I., Voltz M. (éd.), 2005. *Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux*. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, Inra/Cemagref, 64 p.

Bodin M.J., 1840. *Éléments d'agriculture ou leçons d'agriculture appliquées au département d'Ille-et-Vilaine et à quelques départements voisins*. Marteville, Rennes, 178 pages.

Boulaïne J., 1988. *Histoire des pédologues et de la science des sols*. Inra éditions, 297 p.

Cabidoche Y.-M., Lesueur-Jannoyer M., 2011. Pollution durable des sols par la chlordécone aux Antilles : comment la gérer ?. *Innovations agronomiques*, 16, p. 117-133.

Chamayou H., Legros J.-P., 1989. *Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol*. Presses universitaires de France, 593 p.

Chancrin E., Dumont R. 1921. Assolement. *In : Larousse agricole*, p. 109-111. Larousse.

Diamond J., 2005. *Collapse: How societies choose to fail or succeed*. Traduit en 2006 sous le titre *Effondrement. Comment les sociétés décident de leur disparition ou de leur survie*. Gallimard, Folio Essai n° 513, 873 p.

- Duchaufour P., 1997. *Abrégé de pédologie. Sol, végétation, environnement*. Elsevier-Masson.
- Dupraz Ch., Liagre F., 2011. *L'Agroforesterie, des arbres et des cultures*. Éditions La France agricole, 434 p.
- FAO, 2011. *The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW) – Managing systems at risk*. FAO editions, Rome, 47 p.
- Forbes V.E., Forbes T.L., 1997. *Écotoxicologie. Théorie et applications*. Inra éditions, 254 p.
- Garola C.V., 1921. *Engrais. I. Les matières fertilisantes*. Librairie J.-B. Baillière, Paris, 348 p.
- GIEC, 2013. *Changements climatiques, les éléments scientifiques*. Disponible sur www.ipcc.ch.
- Girard M.C. et al., 2011. *Sols et environnement. Cours, exercices corrigés, études de cas*. Dunod, 896 p.
- Gobat J.M., Aragno M., Matthey W., 2003. *Le sol vivant. Bases de pédologie – Biologie des sols*. Presses polytechniques et universitaires romandes, 568 p.
- Gottschalk P., Smith J.U., Wattenbach M., Bellarby J., Stehfest E., Arnell N., Osborn T.J., Jones C., Smith P., 2012. How will organic carbon stocks in mineral soils evolve under future climate? Global projections using RothC for a range of climate change scenarios. *Biogeosciences*, 9, p. 3151-3171.
- Gruber N., Galloways J.N., 2008. *Nature*, 451(17), p. 293-296.
- Heuzé G., 1862. *Cours d'agriculture pratique. Les assolements et les systèmes de cultures*. Hachette, 534 p.
- Jamagne M., 2011. *Grands paysages pédologiques de France*, éditions Quae, 536 p.
- Landa R., Feller C. (éds), 2010. *Soil and Culture*. Springer, 488 p.
- Ming D.W., Henninger D.L. (éd.), 1989. *Lunar Base Agriculture: Soils for plant growth*. ASA, Madison (Wisconsin, États-Unis), 25 p.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington DC (États-Unis).
- Mosier A.R., Syers J.K., Freney J.R., 2004. *Agriculture and the nitrogen cycle*. Island Press, 296 p.
- Nifenecker H., 2011. *Le nucléaire : un choix raisonnable ?* EDP sciences, Paris, 213 p.

Reusser P., Bierman P., Rood D., 2015. Quantifying human impacts on rates of erosion and sediment transport at a landscape scale, *Geology*, published online ; doi:10.1130/G36272.1

Richard *et al.*, 2008. Projet GESSOL DST : dégradation physique des sols agricoles et forestiers liée au tassement : impact, prévision, prévention, suivi, cartographie. Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables.

Robert M., 1996. *Le sol. Interface dans l'environnement, ressource pour le développement*. Elsevier-Masson, 244 p.

Soltner D., 2011 (23^e édition). *Les bases de la production végétale. Tome 1 : le sol et son amélioration*. Sciences et techniques agricoles, Bressuire, 472 p.

Tarradellas J., Bitton G., Rossel D., 1996. *Soil Ecotoxicology*. CRC Press, 386 p.

Crédits iconographiques

Dessins © Jérôme Balesdent : questions 2, 20, 21, 56, 58, 67.

Question 10 : © R. Van den Bogaert, C. Dominici/Inra-AMU.

Question 13 : © Françoise Laurans/Inra.

Question 29 : © Jean Garbaye/Inra.

Question 43 : © IGN/BRGM.

Question 44 : © FAO, 2011.

Question 50 : © Cécile Revellin/Inra.

Question 76 : Inra-ONF.

Coordination éditoriale

Sylvie Blanchard

Édition de la version 2023

Géraldine Doité

Illustrations intérieures et couverture

Anaïs Naimi

Mise en page

Lili Waucheul

Dépot légal

Septembre 2023

Imprimé pour vous par Books on demand (Allemagne)

80 CLÉS POUR COMPRENDRE LES SOLS

Progressivement, nous prenons conscience de la vulnérabilité des sols et des enjeux majeurs qu'ils représentent. Pour nourrir la planète, il faut maintenir leur fertilité, sans les épuiser. Et pour qu'ils jouent pleinement leur rôle de régulateur du climat, il faut en contrôler les changements d'usage, inventer de nouveaux modes de mise en valeur.

Sols des montagnes, des plaines alluviales, des déserts... Très différents, ils portent nos champs, nos forêts, nos villes, et conservent les vestiges de nos civilisations. Aujourd'hui, le séquençage de l'ADN des sols permet de remonter dans le passé de notre environnement.

Soumis à une érosion accrue, aux transferts de fertilité, aux pollutions et à bien d'autres risques, les sols gardent la mémoire des plantes qui y ont poussé, des interactions de la faune et des microorganismes, des travaux et des agressions de l'homme.

Sous forme de 80 questions, au fil de schémas efficaces et d'exemples variés, ce livre relève le défi d'expliquer simplement comment fonctionne un sol, ce qui le caractérise, et raconte la vie de ses habitants, d'une richesse insoupçonnée. Des éléments de base pour suivre les débats actuels, et aussi pour découvrir cette face cachée de notre monde qu'est le sol.

éditions
Quæ

Éditions Cirad, Ifremer, INRAE
www.quae.com

12 €

ISBN : 978-2-7592-3826-2



9 782759 238262

ISSN : 2261-3188

Réf. : 02906