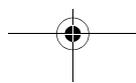
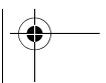
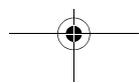
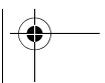


Étude des sols

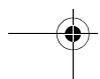
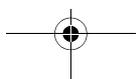
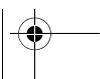




Michel-Claude Girard
Christian Schvartz
Bernard Jabiol

Étude des sols

DUNOD



Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du

droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 2011, 2023 pour la nouvelle présentation
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-085744-9

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	VII
---------------------	------------

Éléments de science du sol et étude de la terre

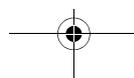
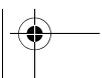
Chapitre 1. Les sols de la Terre	1
Chapitre 2. Les constituants minéraux des sols	13
Chapitre 3. Les constituants organiques des sols	40
Chapitre 4. La vie dans les sols	66
Chapitre 5. La structure des sols	83
Chapitre 6. L'eau dans les sols	103
Chapitre 7. Chimie de la solution des sols	127

Couverture pédologique replacée dans l'espace et le temps

Chapitre 8. Les sols dans l'espace et dans le temps	149
Chapitre 9. Caractérisation des sols	162
Chapitre 10. Spatialisation de la couverture pédologique	189
Chapitre 11. Les interactions entre la couverture pédologique et le milieu	216
Chapitre 12. Les altérations des sols	259
Chapitre 13. Développement, évolutions et utilisations des sols	278
Chapitre 14. Dénomination des sols	318

Fiches - Études de cas

Fiche 1. La dégradation des terres – Alimentation des hommes en 2050	331
Fiche 2. Sols et urbanisation	335
Fiche 3. L'érosion des sols	342
Fiche 4. La salinisation des sols	346
Fiche 5. Les éléments traces dans les sols	353
Fiche 6. Biodiversité des sols et pollutions métalliques	359
Fiche 7. Existe-t-il une teneur en matière organique optimale pour les terres ?	364
Fiche 8. Fertilisation des sols agricoles	371
Fiche 9. Les zones humides	376
Glossaire	380
Bibliographie	397
Index	399



AVANT-PROPOS

Après le succès de l'ouvrage de notre regretté collègue Philippe Duchaufour, c'était une vraie gageure d'entreprendre un ouvrage pour les étudiants du premier cycle de l'enseignement supérieur. Il était cependant impératif de proposer un tel ouvrage, car la connaissance et la gestion des sols sont l'un des enjeux primordiaux dont dépendent la qualité de notre environnement et la production alimentaire nécessaire pour nourrir 9 milliards d'êtres humains. Les sols n'intéressent pas seulement les spécialistes : pédologues, agronomes, écologues, mais aussi les sociologues et les économistes. Ce besoin a été renforcé depuis que l'étude des sols a été réintroduite dans les programmes du secondaire.

Cet ouvrage est destiné à des étudiants de licence, mais il sera aussi utile aux professeurs des Sciences de la Vie et de la Terre. Certaines notions ont été intentionnellement simplifiées ; pour aller plus loin, il existe de nombreux ouvrages spécialisés détaillant les différents mécanismes et déterminant les propriétés ou comportements des sols.

L'ouvrage est basé d'une part sur les cours des trois auteurs, ainsi que sur ceux que Jean Boulaine a dispensés à l'Institut National Agronomique Paris-Grignon, rédigés à partir de 1971 et dont les trois auteurs sont les anciens élèves.

L'étude des sols est pluridisciplinaire. Cela en fait le charme, mais aussi les difficultés. Le risque étant, bien entendu, que chaque discipline considère que la réponse à telle question ne dépend que de son domaine. Dans ce cas-là, le sol n'est plus l'objet d'étude, mais devient seulement le sujet d'analyse. Les réponses concernent alors des échantillons de terre, non pas le sol dans la globalité de son fonctionnement.

Le contenu de l'ouvrage comporte trois grandes parties :

1. Éléments de science du sol et étude de la terre : chapitres 1 à 7.
2. La couverture pédologique replacée dans l'espace et le temps : chapitres 8 à 14.
3. La place du sol dans les préoccupations des décideurs ou relatives aux questions sur la dégradation, la pollution, ou la valorisation des sols. Quelques exemples sont donnés sous forme de fiches.

D'autres fiches seront développées et seront disponibles sur les sites de l'AFES et de Dunod. Cela contribuera à enrichir l'ouvrage sur des aspects nouveaux du développement de l'étude des sols. C'est peut-être le début d'une encyclopédie des sols sur internet – une « wikisol » ? C'est un challenge que les auteurs proposent à leurs collègues et à tous ceux qui travaillent sur les sols. Le réseau de l'Association Française pour l'Étude du Sol pourrait y contribuer.

Étude des sols

De nombreux renvois d'un paragraphe à un autre sont inclus dans le texte ; le premier numéro correspond à celui du chapitre, les autres chiffres renvoient aux paragraphes.

Un glossaire, simple, est associé à l'ouvrage. Il est accessible à partir de la page « Recherche » du site de l'ISA Lille (www.isa-lille.fr).

La bibliographie présentée en fin de volume est volontairement succincte. Une version complète est disponible sur les sites Internet de Dunod et de l'AFES.

Plusieurs sites internet sont aussi indiqués en notes infrapaginales dans le courant des chapitres. Ils permettent notamment d'accéder à des informations évolutives ainsi qu'à des illustrations en couleur.

La dénomination des sols est conforme à la dénomination française du Référentiel Pédologique (2008) : les noms des références sont écrits en PETITES MAJUSCULES, et les noms de grands ensembles de référence (GER) sont en minuscule avec une majuscule : par exemple « Ferrallitols ».

Nous remercions nos collègues ayant participé à la rédaction des fiches de la troisième partie de l'ouvrage : D. Baize (INRA), C. Chevery (Académie d'agriculture de France), O. Grünberger (IRD, Montpellier), C. Pruvot (Groupe ISA-Lille), J.-P. Rossignol (INPH, Angers).

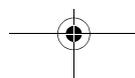
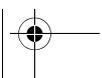
Nous remercions tous les relecteurs bénévoles ayant accepté de nous faire part de leurs réflexions sur cet ouvrage, qui servira à leurs étudiants : Mesdames D. Aran (université de Metz), C. Collin-Bellier (Solenvie, E.U.R.L.), C. Pruvot (Groupe ISA-Lille) et Messieurs D. Baize (INRA), B. Benaricha (Algérie), L. Caner (université de Poitiers), Y. Coquet (AgroParisTech), B. Fabre (ISARA, Lyon), M. Foukani (Groupe ISA-Lille), J.-L. Julien (LDAR, Aisne), E. Lucot (université de Franche-Comté), P. Mérot (Agrocampus Ouest), X. Morvan (université de Reims), J. Ranger (INRA, Nancy), J.-P. Rossignol (INPH, Angers), S. Salvador-Blanes (université de Tours), D. Schwartz (université de Strasbourg), C. Waterlot (Groupe ISA-Lille).

Les illustrations couleurs proviennent des auteurs ou des collègues suivants :

A. Beaudou (IRD), S. Gaudin (forestier), M.-C. Girard (Académie d'agriculture de France), O. Grünberger (IRD, Montpellier), M. Isambert (INRA), B. Jabiol (AgroParisTech), M. Jamagne (INRA), J.-L. Janeau (Gissol), F. Lebourgeois (AgroParisTech), A.-L. Le Bris (Agrocampus Ouest), J. Moeys (Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala), L. Montanarella (JRC, Italie), J.-M. Rivière (Agrocampus Ouest), J.-P. Rossignol (INPH, Angers), C. Schwartz (Groupe ISA-Lille), C. Walter (Agrocampus Ouest).

Une grande partie des figures a été dessinée par Christophe Carle (Agrocampus Ouest) pour le cours de M.-C. Girard à l'Institut national Agronomique Paris-Grignon : qu'il en soit remercié grandement.

Michel-Claude Girard, Christian Schwartz, Bernard Jabiol



LES SOLS DE LA TERRE

1

PLAN

- 1.1 Les différentes approches du terme terre
- 1.2 Les différentes approches du terme sol
- 1.3 Le sol
- 1.4 La couverture pédologique
- 1.5 Horizon et solum
- 1.6 Sols et interactions
- 1.7 Des flux
- 1.8 Une enveloppe terrestre mais aussi marine
- 1.9 Diverses dimensions
- 1.10 Conclusion

Le mot « sol », peu différencié dans le langage courant du terme « terre », n'apparaît pas comme un terme sympathique. Ces termes sont liés, dans notre culture, à ce qui est maudit « maudit soit le sol à cause de toi » (Genèse 3, 17) et ce qui salit : « tu t'es traîné par terre : va te laver les mains », « ne marche pas dans la terre, reste sur le chemin », « tu t'es taché en jouant dans la terre, va te laver », etc. Ces multiples injonctions parentales existent dans le quotidien de notre enfance pour la plupart d'entre nous. Est-ce une des raisons de notre méfiance à l'égard de cette entité qui nourrit les plantes, régule les flux d'eau, présente la plus grande biodiversité, etc., sur laquelle nous marchons ? Cependant ne sommes-nous pas étonnés de savoir que ce « sol » contient des bactéries qui produisent les antibiotiques ? Ou que les argiles qui le constituent sont utilisées en pharmacopée (beidellite, attapulгите, smectite) pour les diarrhées ou comme pansement gastrique pour les ulcères d'estomac ? On trouve aussi les argiles (§ 2.2.1) dans les jardinerie comme composant des litières pour animaux (80 % d'illite, 10 % de kaolinite, pour un pH de 8,4 et une masse volumique apparente de $900 \text{ g}\cdot\text{dm}^{-3}$) ; les argiles (smectites) sont présentes en cosmétique (masques d'argile, dégraissant des cheveux...) ou évidemment comme matériau de construction (pisé, tuiles, briques) et pour l'isolation thermique.

1.1 LES DIFFÉRENTES APPROCHES DU TERME TERRE

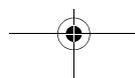
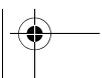
Le mot **terre** (Gé, Γῆ en grec), déesse de la Terre-Mère qui engendre Ouranos, le ciel, est employé, dans des sens très divers :

- notre planète Terre ;
- en lien étroit avec l'ensemble des Humains « être connu de la terre entière » ou en un sens plus lié à l'Homme « sa terre natale » ;
- en relation à la transcendance : « sur la terre comme au ciel ». En hébreu, אדמה signifie : terre et Adam ;
- l'opposé de la mer : la terre ferme, les terres émergées. (Ce qui laisse logiquement comprendre qu'il y a des terres immergées ; figure 1.3) ; « être sur la terre ferme » ;
- une superficie, correspondant à une propriété foncière : « voici mes terres », « la terre de mes ancêtres », etc., ou le prix des terres¹ (qui dépend de son utilisation : forêt, culture, vigne, résidence secondaire, etc.), « vendre ses terres ». Mais aussi la surface de notre planète (l'ensemble des lieux habités) ;
- une couche meuble de la couverture pédologique où poussent des plantes : la terre arable, une « terre à blé », une « terre inculte, ainsi que l'élément de base de la vie « le produit de la terre et du travail des Hommes » ;
- le **comportement**, les propriétés ou les qualités de la couche superficielle de la couverture pédologique utilisée par l'homme : « terre franche », « terre souple », « terre humifère », « terre sableuse », « terre légère », « terre douce », « terre argileuse », « terre lourde », « terre calcaire », « terre chaude », « terre froide », « terre pauvre », « terre de bruyère », mais aussi une « terre caillouteuse », la « terre fine » (§ 2.1.2) ;
- les utilisations du matériau terre : « terre à briques », « terre à foulon », « terre végétale », « terre de bruyère », « terre glaise » ;
- il faut rappeler que l'expression « Sciences de la Terre » comporte surtout la géologie, la géomorphologie, l'hydrologie, la limnologie..., cependant depuis 2010, la pédologie est entrée dans les programmes de l'enseignement secondaire en seconde et première ;
- les **caractéristiques** de la surface : « terre rouge », « terre noire », « terre blanche », etc. Notons que les termes vernaculaires sont assez proches de cette approche. Mais il faut faire attention car ils cachent souvent des différences importantes. Ainsi les « terres noires », que l'on trouve en Limagne, ont peu de points communs avec les chernozems ukrainiens (« cherno » = noir et « zem » = sol, en russe) ou les andosols (« and » = noir et « do » = sol, en japonais).

Définition 1.1

La terre est définie dans cet ouvrage comme un échantillon de « sol » (voir ci-dessous) prélevé dans n'importe quel endroit de la couverture pédologique. En conséquence, il ne permet pas d'étudier les transferts potentiels s'exerçant dans celle-ci. La terre est donc un matériau, lié à l'utilisation du sol par l'Homme : il la travaille, l'échantillonne... ou y repose.

1. Consultez le site des Sociétés d'aménagement foncier et d'établissement rural (SAFER) www.safer.fr



Il est intéressant de traduire le mot terre dans ses différents sens, ce qui donne en anglais, par exemple : La Terre : *World* ; le globe terrestre : *Earth* ; la base, le terrain : *ground* ; le sol : *soil* ; la terre natale : *native land* ; la dernière demeure : *grave* ; le plancher : *floor* ; la saleté : *dirt* ; la propriété : *estate* ; la terre ferme : *shore* ; le territoire : *land*.

Signalons aussi le terme de « terrain » qui prend en compte à la fois les aspects géographiques, économiques et fonciers, et qui se situe, de ce fait, au niveau de l'exploitation agricole, du bassin versant, ou au niveau de l'écosystème. Le terme est aussi utilisé comme l'opposé de laboratoire : « travail de terrain » versus « étude en laboratoire ».

1.2 LES DIFFÉRENTES APPROCHES DU TERME SOL

1.2.1 Le langage courant

Le mot « sol » est utilisé avec de nombreux sens dans le langage commun. Mises à part la note de musique et l'ancienne monnaie en France (le sol) ou actuelle au Pérou, on peut en distinguer plusieurs selon que le sol est conçu comme :

- Ce qui est sous les pieds de l'homme, voir les expressions telles que : « au ras du sol », « au niveau du sol », « creuser le sol », « entresol », etc. ou « revêtements de sol » (tels que dallage, carrelage, moquette...) ; « exercices au sol » (gymnastique).
- L'interface entre l'atmosphère et la biosphère : « étude au sol », « station-sol », « retour au sol » pour l'aéronautique.
- Un support, une surface à deux dimensions : unité spatiale subdivisée par l'Homme pour des objectifs administratifs ou fonciers, « surface au sol » d'un bâtiment, « plan d'occupation des sols », superficie déterminant une base de l'impôt (cadastre).
- Une partie du paysage, un espace, un territoire : « le sol natal », « le droit du sol ».
- Un liquide contenant une matière dispersée dans sa masse sous forme colloïdale, par exemple hydrosol (solution colloïdale où l'eau sert de solvant).
- Un volume : réservoir des substances nutritives et de l'eau ; filtre pour l'eau (fiche 9) ; couche meuble qui est cultivée, habitat des racines, vers de terre, taupes (photographie 3) ; ensemble de la croûte terrestre, etc.

1.2.2 Les fonctions

Dans une approche systémique, la définition du sol se fait à partir des fonctions qu'il remplit. De ce point de vue, fonctionnel, le sol est le produit de l'altération, du remaniement et de l'organisation des couches supérieures de la croûte terrestre sous l'action de la vie, de l'atmosphère et des échanges d'énergie qui s'y manifestent.

La norme européenne ISO 11074 (1997) définit de la façon suivante ces différentes fonctions du sol :

- contrôle des cycles des éléments et de l'énergie en tant que compartiment des écosystèmes ;
- support des plantes, des animaux et de l'homme ;
- base des constructions et des immeubles ;
- production agricole ;
- rétention de l'eau et des dépôts ;
- constitution d'une réserve génétique ;
- conservation en tant que mémoire de l'Histoire et de la nature ;
- protection en tant qu'archive archéologique et paléocéologique».

Ces diverses fonctions transforment le sol ainsi défini, l'améliorent, le conservent ou le détériorent.

En considérant les aspects sociologiques et économiques, on peut adjoindre à ces fonctions sa valeur d'échange qui correspond à une valeur financière variant avec sa localisation, sa superficie, sa position dans le paysage, son utilisation actuelle et les possibilités d'effectuer telle ou telle activité humaine (Jayet, De Cara, 2011).

1.2.3 Les utilisateurs

Le concept de sol varie selon ses utilisateurs (figure 1.1).

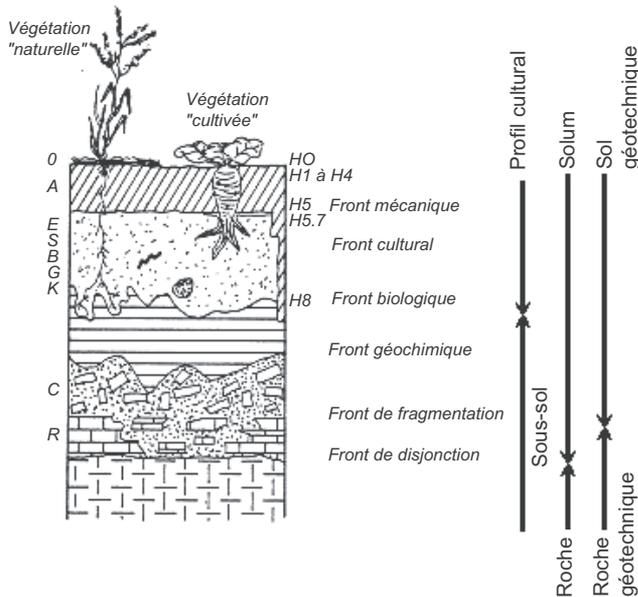


Figure 1.1 - Sol, solum, sous-sol et roche selon les divers utilisateurs.

Les extrémités des flèches indiquent des valeurs modales. Il y a évidemment des recouvrements.

Pour l'agronome et le forestier, il est conçu comme une ressource constituant une réserve d'éléments nutritifs pour la végétation (cultivée ou non) et le lieu de croissance et d'activité des racines. C'est un garde-manger plus ou moins grand et plus ou moins plein. Sa qualité se décline en matière d'éléments utilisables : est-il préférable d'avoir un grand garde-manger permettant un grand développement des racines, mais peu rempli, ou un petit garde-manger limitant l'enracinement, mais plein ?

Pour l'urbaniste, il constitue un matériau susceptible de recevoir des fondations et les éléments de viabilisation nécessaires à la construction de bâtiments (Rossignol *et al.*, 2011 – fiche 2).

Pour le géologue, le sol est plutôt ce qui empêche de voir directement les roches en surface.

Pour le géotechnicien, le sol est constitué de tout matériau plus ou moins meuble, couverture pédologique et altérite, qui se situe au-dessus de la roche non altérée.

Pour les pharmaciens ou industriels, il est perçu comme une ressource constituant une réserve d'éléments utiles pour eux : antibiotiques, argiles, graviers (ferrallitiques) pour les routes, or, etc.

Pour le climatologue, le sol est un écran qui utilise une partie de l'énergie du soleil et des pluies et en réfléchit une autre, et qui émet une certaine énergie liée à sa propre température de surface.

Pour l'industriel il est souvent considéré comme un réservoir où l'on déverse des sous-produits ou comme un filtre gratuit qui permet de moins polluer les eaux souterraines (c'est le sol qui devient pollué).

Pour le citadin ou le sportif, il constitue un support de ses diverses activités et où il pose ses pieds ou ses crampons.

Pour le géomètre et le financier, ainsi que pour le juriste, il représente une superficie à laquelle sont attachés des redevances, des droits et devoirs.

Pour l'écologue, il est source de transfert, de production et de stockage d'eau et d'éléments minéraux ou organiques, de même qu'un réservoir de biodiversité.

Pour le pédologue (spécialiste de l'étude des sols), c'est un volume qui évolue dans le temps, qui crée son organisation propre (sa structure, ses horizons, ses systèmes) qui permet le développement de la vie, et est riche d'une très grande biodiversité végétale et animale.

1.2.4 Utilisation du mot sol

Le mot sol est actuellement utilisé dans divers ouvrages traitant de pédologie ou de science du sol. C'est un terme générique qui doit être employé avec précaution et recouvre les significations suivantes.

« Le sol » caractérise ce qui existe en un lieu de la couverture pédologique, à un moment donné : *le sol de mon jardin*. Ou bien ce peut être un concept abstrait, générique, pratique dans la conversation courante, mais très flou : *la science du sol*.

« Les sols » indiquent l'état de la couverture pédologique sur un espace défini par des limites cartographiques, administratives, cadastrales ou paysagiques : *les sols de France, les sols de la Bretagne, des bas de versant*.

« Les sols » peuvent aussi indiquer un regroupement taxonomique de sols : *les sols tropicaux*, ou correspondre à des termes génériques tels que les Luvisols, les Ferrallitols qui, dans le Référentiel Pédologique (2008)¹ (§ 14.5) regroupent différentes références de sols.

1.3 LE SOL

Définition 1.2

Un sol est un ensemble organisé (en différents horizons), évolutif, où la vie est présente et dont le matériau est la terre. Il est le lieu de transferts de flux : eau, air, énergie et vie.

Dans cet ouvrage, on utilisera ce terme de manière générique, sa position dans l'espace à trois dimensions n'étant pas précisée : ni son extension géographique, ni sa profondeur, ni sa position dans le paysage.

Si depuis très longtemps on parle de sol² (Boulaine, 1988), ce n'est que depuis un peu plus d'un siècle qu'on a défini les sols en tant qu'objets d'étude, ce qui a conduit à définir la pédologie. Le terme pédologie vient du grec *πέδον* *pédon* : ce qui est sous les pieds (et non de *παιδός*, *paidós* : l'enfant), et de *λόγος*, *logos* : science, discours sur. Son équivalent latin a donné en français : science du sol.

Trop souvent le sol est considéré comme un échantillon de la couche supérieure de la croûte terrestre composé de particules minérales, de matières organiques, d'eau, d'air et d'organismes. Il est conçu comme une entité indépendante de sa position géographique dans le paysage, donc sans relation avec les sols voisins. Cela sous-entend qu'il existerait un individu sol.

Mais ce n'est pas le cas, il n'y a pas d'individu sol mais un *continuum* qui présente des caractères différents dans les trois dimensions spatiales. Il ne constitue pas à proprement parler un objet. On parle donc d'une « couverture pédologique » (terme, proposé par Fridland dans les années 1975) qui constitue l'enveloppe de la Terre, son épiderme. Cet épiderme assure une couche tampon entre, d'une part, les flux supérieurs : climat (et ses changements), océans (et leurs courants) et, d'autre part, les flux internes de la Terre et des nappes d'eau.

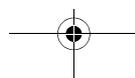
1.4 LA COUVERTURE PÉDOLOGIQUE

Définition 1.3

La couverture pédologique est continue, tridimensionnelle, évolutive, superficielle et souvent meuble (§ 8.1). Elle résulte de la transformation de matériaux (minéraux, organiques) par divers fluides (eau, gaz) et par des êtres vivants (microorganismes aérobies ou anaérobies, animaux et végétaux), sous l'influence de processus biologiques, physiques et chimiques. C'est un lieu de flux de matières (organique et minérale) dus à diverses sources d'énergies : gravité, pressions, chaleur, vie, et solaire. Elle évolue constamment (durée d'évolution) avec des vitesses variables et à divers pas de temps (périodicité).

1. http://www.inra.fr/internet/Hebergement/afes/Ressources/ouvr_fr.php

2. Voir le site www.afes.fr (histoire des pédologues).



Tout sous-ensemble d'une couverture pédologique est inscrit dans le paysage qui conditionne son évolution (chapitre 11) : les liens avec le paysage sont donc nécessaires à prendre en compte pour comprendre son organisation et son évolution.

Définition 1.4

Cela permet de décrire le **pédopaysage** comme l'ensemble des horizons pédologiques et des éléments paysagiques (végétation, effets des activités humaines, géomorphologie, hydrologie, substrat ou matériau parental) dont l'organisation spatiale permet de définir dans son ensemble une (ou une partie d'une) couverture pédologique.

1.5 HORIZON ET SOLUM

Définition 1.5

Horizon et solum sont des volumes qui permettent de subdiviser la couverture pédologique (figure 8.1).

L'horizon, volume homogène, est défini par une enveloppe et un contenu. Il est toujours voisin d'autres horizons plus ou moins différents de lui, et est lié à eux par des relations géographiques et fonctionnelles. Il appartient au domaine du réel et non du concept, mais on peut le conceptualiser et en faire des typologies (§ 9.11).

Le solum est un volume hétérogène défini pour l'étude et l'échantillonnage des divers horizons¹ (§ 9.1.2). Il correspond à une tranche verticale d'une couverture pédologique observable dans une fosse ou une tranchée.

1.6 SOLS ET INTERACTIONS

Le sol est un lieu d'interactions entre les différentes sphères conceptuelles constituant le globe terrestre. Des exemples d'interactions sont présentés ci-dessous (figure 1.2).

Le terme de couverture pédologique insiste sur le fait que les sols forment un volume (pédosphère) situé : 1) sur un autre volume le plus souvent minéral : le substrat (lithosphère) ; 2) épousant le relief (toposphère) ; 3) sous un autre volume qui est l'atmosphère ou les étendues d'eau ; et enfin 4) en intersection avec deux autres volumes : la biosphère, par sa biodiversité, et l'hydrosphère. Les relations entre ces sphères déterminent les facteurs d'évolution des sols (chapitre 11) : ils interagissent dans la durée et nécessitent une certaine énergie.

Les interactions entre atmosphère et hydrosphère sont principalement la pluie et l'évaporation, ce qui permet de constituer les solutions du sol par leur contact avec la lithosphère (eau, oxygène, éléments minéraux), essentielles pour le développement

1. <http://dictionnaire.reverso.net/francais-definition/solum>

de la vie tellurique. Les liens entre atmosphère et biosphère correspondent à des échanges énergétiques et de matière liés à la photosynthèse et à la respiration. Entre atmosphère et lithosphère, ce sont les échanges de chaleur et les éruptions volcaniques, parfois le rôle du CO₂ dans la dissolution du calcaire. L'hydrosphère et la toposphère déterminent les transferts latéraux de matières ou de solutés, des formes d'érosion et de dépôt de matériaux terreux. L'hydrosphère et la biosphère déterminent les conditions de vie, entre autres aquatiques. La biosphère intervient d'une manière importante dans l'altération des matériaux de la lithosphère. La lithosphère et la toposphère contribuent à modeler les multiples formes du relief sous l'influence de l'hydrosphère et de la gravité.

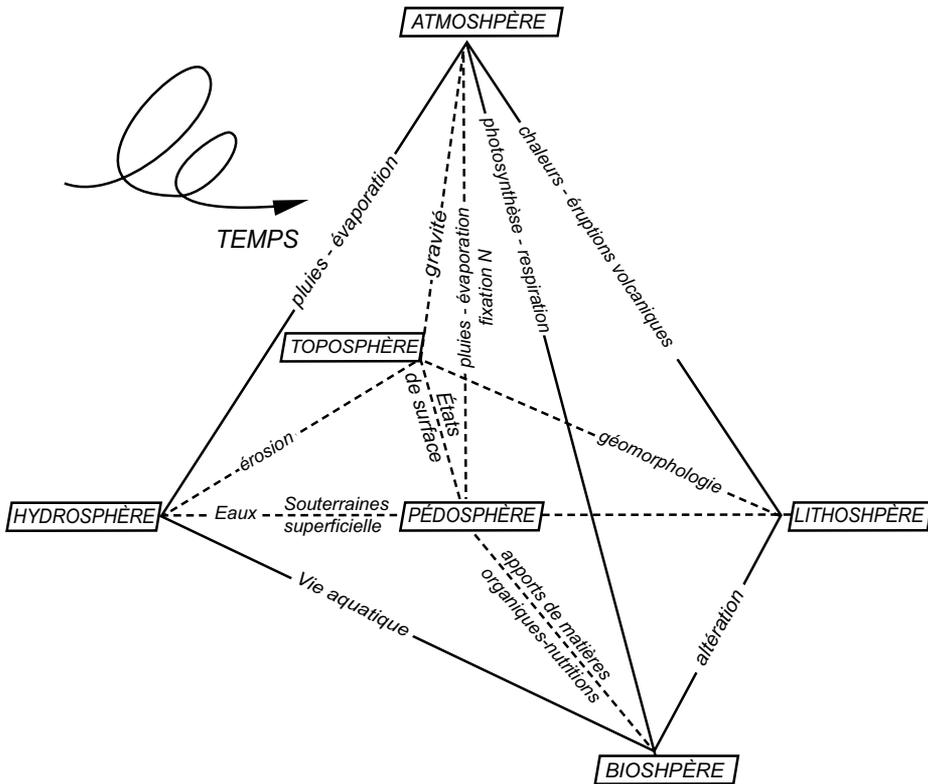


Figure 1.2 - Interactions entre pédosphère et les autres sphères.

Les six sphères étant représentées par leur centre, il va de soi qu'elles s'interpénètrent.

La pédosphère interagit elle-même avec ces différentes sphères :

- Les états de surface de la couverture pédologique sont en relation directe avec la toposphère, la gravité, l'hydrosphère, les vents et l'érosion.
- La circulation de l'eau, verticale ou latérale, dans ou au-dessus de la couverture pédologique est en relation avec l'hydrosphère, mais aussi avec la toposphère et

- sous l'influence de la gravité : les eaux de nappe, superficielles et profondes, l'évaporation, l'évapotranspiration, les pluies, mais aussi avec les eaux marines.
- La biosphère influence la pédosphère par ses apports organiques (feuilles se décomposant, pluviollessivats et surtout racines, et faune du sol) ainsi que par des prélèvements de nutriments que les sols mettent à sa disposition.
 - La lithosphère, en plus d'un support à la couverture pédologique, constitue une ressource de minéraux qui sont transformés, altérés et réorganisés (§ 12.2 et 12.3).

1.7 FLUX

La couverture pédologique est essentiellement gérée par des flux, des transferts (figure 13.1). Il est difficile de parler de formation du sol comme si le sol prenait naissance à une date donnée (sauf dans des cas très rares, telle la surrection d'un volcan en pleine mer). En permanence, la couverture pédologique acquiert des constituants nouveaux par altération des « matériaux parentaux » situés à sa base ou en son sein (figure 11.7). Ces matériaux parentaux peuvent être transférés de l'amont vers l'aval ou arriver par dépôts éoliens. En permanence, la couverture pédologique perd des matériaux en surface par divers types d'érosion (fiche 3), par évaporation, ainsi qu'en son sein par transfert de solutions diversement chargées en ions (chapitre 7). Des transferts latéraux au sein de la couverture pédologique ont lieu en permanence par la gravité, l'activité biologique animale ou végétale (chapitre 4), et en particulier par les échanges au niveau des racines, le développement de ces racines et les transferts assurés par la faune tellurique.

Des sources d'énergie sont donc nécessaires : gravité, soleil, champs électromagnétiques, champs de pression, etc., il y a donc lieu d'étudier non seulement les éléments constitutifs des sols mais en même temps les forces qui en assurent la dynamique.

1.8 UNE ENVELOPPE TERRESTRE MAIS AUSSI MARINE

La couverture pédologique est toujours présente à la surface des terres émergées, même sous les glaces (Tedraw, Ugolini, 1966). Elle peut s'épaissir, être recouverte, submergée ou, au contraire, être érodée. Certains horizons sont alors enterrés, inondés, amincis ou déplacés, et une nouvelle évolution se développe. Il en est de même si les conditions du milieu changent : climat, occupation des sols, géomorphologie.

La couverture pédologique est aussi présente sous les eaux marines et continentales. Les formes de vie qui s'y développent sont très différentes de celles des terres émergées et il s'exerce, dans les grands fonds, des pressions très fortes.

La continuité de la couverture pédologique entre terre et mer s'observe dans les mangroves, la slikke, et le schorre (§ 11.8.2 d). Des formes d'humus submergés existent, ce sont les Gytja, les Dy, et les Sapropel (§ 11.9.3 d).

Sous l'eau on retrouve tous les produits libérés puis entraînés lors des évolutions de la couverture pédologique des terres émergées et donc, principalement, les

cations les plus solubles, le calcium en particulier (figure 1.3), et les particules migrant le plus facilement : les argiles (Windom, 1976).

Pour cette raison, il est intéressant d'associer la carte des sols du monde à la carte de la répartition des matériaux terreux (sédiments marins) bien moins détaillée que celle des sols. En effet, les matériaux qui tapissent le fond des mers et océans actuels se retrouveront être les matériaux parentaux des sols lorsqu'ils seront exondés lors des mouvements tectoniques futurs. Et, de même, les matériaux actuellement exondés seront submergés lors de la montée du niveau de la mer ou d'effondrement de la croûte terrestre sous d'autres actions tectoniques. On retrouve ainsi dans les sédiments marins des traces d'une structure pédologique à l'air libre, comme les fentes de dessiccation (mais aussi des traces de pas d'animaux). Les cartes de la répartition de l'abondance relative des minéraux argileux fins ($< 1 \mu\text{m}$) dans les sédiments océaniques (selon Lisitzin, 1996¹) montrent que les accumulations maximales sont liées chorologiquement (§ 8.2.2) aux sols dans lesquels se trouvent, ou se forment, ces types de minéraux argileux.



Figure 1.3 – Distribution des matériaux terreux marins. (D'après Davies and Gorsline, 1976 in Horst D. Schulz, Matthias (Eds.), 2006, où l'on trouve aussi la répartition de la kaolinite, de l'illite, des smectite et chlorite).

Continents : blanc - matériaux terreux des plateformes continentales provenant des transferts des sols émergés : noir - matériaux terrigènes (dont les arrivées deltaïques) : gris clair - argiles rouges des grands fonds : gris sombre - matériaux carbonatés : rayures horizontales - matériaux siliceux : pointillés noirs - matériaux glaciaires : tiretés verticaux.

1. Argiles/carte marine-chap_6b ulg.ac.be http://www.ages.ulg.ac.be/cours/argiles/argiles-chap_6.pdf

Dans les océans, les gaz ne sont pas les mêmes qu'à l'air libre. Ainsi la teneur en oxygène devient quasi nulle en dessous de 200 m de profondeur, tandis que les teneurs en H_2S deviennent importantes en dessous de 600 m. Les évolutions sont donc modifiées. Ainsi le calcaire est dissous complètement au-delà de 5 000 m de profondeur, et à des profondeurs moindres dans les océans froids puisque le froid augmente la solubilité du CO_2 et des carbonates.

1.9 DIVERSES DIMENSIONS

L'étude pédologique requiert une analyse à diverses dimensions (figure 1.4) : de l'atome à l'horizon en passant par la structure des minéraux ou des constituants organiques puis par la structure de l'agrégat (§ 5.2) : fond matriciel, observable au microscope, plasma observable au microscope électronique, etc. (chapitres 5 et 9), puis de la couverture pédologique (chapitre 10) pour l'ensemble du Globe en passant par le bassin versant et le pédopaysage.

Le niveau d'appréhension pour l'Homme est celui de l'horizon : il marche sur l'horizon de surface et connaît rarement les horizons sous-jacents. Il est vrai que, pour ce faire, il faut creuser : « Remuez votre champ dès qu'on aura fait l'oût. Creusez, fouillez, bêchez... Un trésor est caché dedans. » écrivait Jean de La Fontaine dans « Le Laboureur et ses Enfants ».

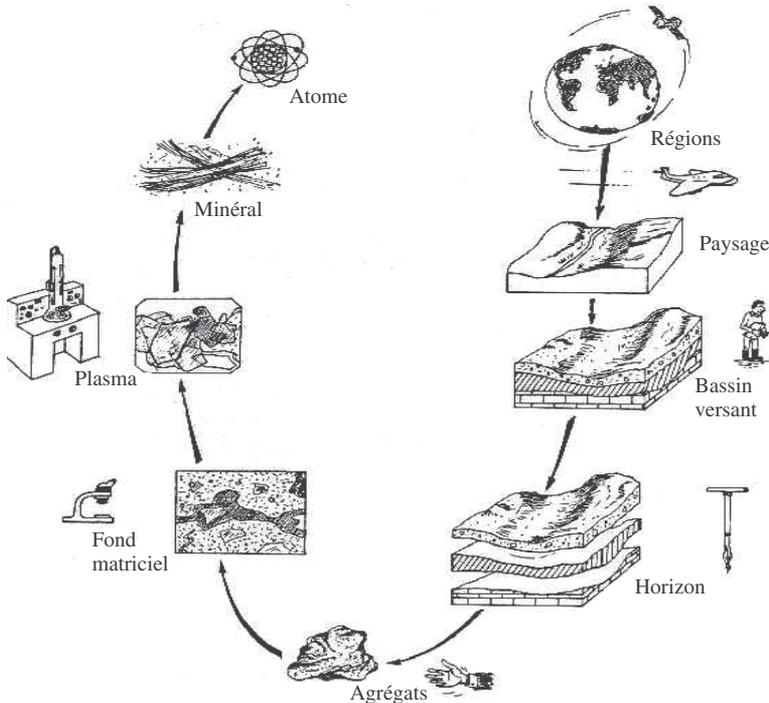


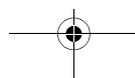
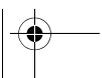
Figure 1.4 - Les différents niveaux d'analyse de la couverture pédologique et les outils d'étude correspondants.

En étendant sa vue, l'Homme voit le paysage mais y associe rarement le sol : la notion de pédopaysage lui est donc étrangère la plupart du temps, alors qu'elle était intuitive pour le paysan d'autrefois. Lorsqu'il observe les images satellitales (que l'on voit tous les jours au journal « météo »), il n'imagine pas les liens existant entre le sol, les plantes, l'évaporation et les courants généraux de la circulation atmosphérique. Le sol est un peu le trésor enfoui, secret, qu'il faut maintenant découvrir.

En regardant de plus près, l'Homme, s'il accepte de saisir la terre et de l'observer, appréhende l'agrégat qui la plupart du temps tient dans sa main. Ensuite, muni d'un microscope optique, électronique à balayage ou à transmission il peut découvrir les microstructures internes du sol et interpréter, par exemple, l'histoire du sol ou les différents types d'argile. Au-delà, on retourne à l'atome et sa structure qui par certains côtés peuvent évoquer la place de la Terre dans l'espace.

1.10 CONCLUSION

En matière de conclusion, citons l'avis d'un enseignant du secondaire (Monchamp, 1993) dans un article de l'Institut national de recherche pédagogique (INRP) : « Le sol constitue un bon sujet d'apprentissage car c'est un "objet" paradoxal. Il appartient, en apparence, au domaine de la matière tangible, du continu homogène et massif, de l'immuable alors qu'en fait il est constitué d'éléments invisibles dont l'agencement est régi par des lois qui lui permettent d'être organisé, d'évoluer, de réagir et résister à des actions matérielles, d'être dégradé... ». Dans *Le Phénomène humain* Teilhard de Chardin écrit : « À des ordres de grandeur divers, la matière ne se répète jamais dans ses combinaisons... Les enveloppes dont la Matière se compose sont foncièrement hétérogènes les unes par rapport aux autres. Cercle... des électrons et autres unités inférieures. Cercle, plus loin, des inépuisables combinaisons moléculaires. Enfin, par saut ou retournement de l'infime à l'immense, cercle des astres et des galaxies. » Pour rester en trois dimensions, il faut remplacer les « cercles » par des sphères. Mais il manque la pédosphère : celle qui fait l'objet de cet ouvrage.



LES CONSTITUANTS MINÉRAUX DES SOLS

2

PLAN

- 2.1 Analyse granulométrique
- 2.2 Nature et propriétés des constituants minéraux
- 2.3. Granulométrie, propriétés des constituants et propriétés des terres

Analyser globalement un échantillon de terre tel qu'on peut le prélever est trop complexe, ses constituants sont bien trop variés : il faut donc le fractionner. Le premier critère de tri qui s'impose sépare les constituants organiques et minéraux, mais cela ne suffit pas. Comment subdiviser à leur tour ces deux ensembles de façon à ce que le résultat soit pertinent pour étudier et comparer les propriétés de différents sols ou de différentes terres ? Nous nous intéresserons dans ce chapitre aux constituants minéraux ; les constituants organiques seront ensuite abordés au chapitre 3.

Pour subdiviser les constituants minéraux, une première solution consiste à distinguer les carbonates des autres constituants (silicates, oxydes et hydroxydes pour l'essentiel). En effet, les carbonates ont la particularité d'être parfois très abondants, comme dans les sols calcaires, ou totalement absents. De plus, suivant les conditions physico-chimiques du milieu, les carbonates ont la possibilité d'être solubilisés et de précipiter à nouveau à des pas de temps ou de distance parfois très courts. Malgré cette spécificité intéressante des carbonates, une telle classification regrouperait encore dans une même catégorie les matériaux siliceux qui constituent les dunes et ceux, plus argileux, des terres à briques. Le sens commun le plus évident confirme que cela n'est pas très pertinent, tant leurs propriétés sont manifestement différentes ; il faut donc trouver une autre solution.

Deux constatations complémentaires permettent une nouvelle approche. La première considère que la terre est constituée de particules minérales élémentaires de tailles très diverses : ceci est visible à l'œil ou à la loupe binoculaire pour des particules plus fines, parfois même perceptible au toucher. La seconde montre qu'il y a un lien entre la taille de ces particules et le comportement de la terre : si les particules sont majoritairement fines, le toucher sera doux, voire collant, lorsque le matériau est humide ; si les particules sont plus grossières, le contact sera plus rugueux. L'expérience a montré que ces observations très simples étaient généralisables : de nombreuses propriétés des terres (perméabilité, capacité d'échange, réserve

hydrique, aptitude à la fissuration...) sont très largement dépendantes de la taille de leurs constituants minéraux.

La répartition de ces particules dans des classes de taille déterminées correspond à la granulométrie de la terre, son comportement lié à cette granulométrie, correspond à sa texture.

L'analyse de la granulométrie d'une terre ne concerne que sa fraction minérale. Parfois même, les carbonates sont préalablement détruits, ce qui est une façon de combiner les deux approches évoquées ci-dessus. Il est cependant également possible d'étudier de façon spécifique la granulométrie des matières organiques (§ 3.2.2 b).

2.1 ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE

Une analyse granulométrique est constituée par deux séries d'opérations distinctes : la destruction totale de tout lien entre les particules élémentaires afin de les individualiser (c'est-à-dire la destruction de tous les agrégats), puis le tri de ces particules en fonction de leur taille. Le protocole analytique correspondant est détaillé dans la norme NF ISO X31-107.

2.1.1 Individualisation des particules élémentaires

Il existe deux grands types de mécanismes à l'origine de l'agrégation des particules élémentaires du sol : l'agrégation par des ciments et l'association directe des particules les unes aux autres (§ 5.1).

a) Ciments

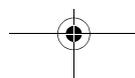
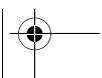
Des ciments enrobent les particules élémentaires et les agrègent en des édifices plus ou moins solides. Les plus fréquents sont :

- les matières organiques ;
- les carbonates ;
- les oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium.

Toutes les matières organiques proviennent, directement ou non, des réactions de photosynthèse qui, à partir de la réduction du carbone du CO_2 atmosphérique, élaborent des glucides. C'est pourquoi une oxydation, par un traitement au peroxyde d'hydrogène dilué (H_2O_2 30 % v/v), permet de détruire ce ciment organique (§ 3.2.1 b).

Les autres ciments sont solubles en milieu acide : ils sont dissous par un traitement à l'acide chlorhydrique (HCl 2 mol·L⁻¹).

Cependant, il ne faut pas oublier que le calcaire (CaCO_3) peut aussi constituer des particules à part entière. Le traitement par HCl va donc non seulement détruire un ciment carbonaté, mais aussi certaines des particules que l'on cherche à individualiser. Pour des sols où le calcaire peut représenter jusqu'à plusieurs dizaines de pour



cent de la masse totale, cet artefact est loin d'être anodin. Nous reviendrons dans la discussion ci-dessous sur cette question importante (§ 2.1.1 c).

b) Association directe

Dans le sol, la plupart des particules solides présentent des charges électriques, majoritairement négatives (minéraux argileux, § 2.2.1 b et matières organiques, § 3.2.3 b) notamment). Ce sont donc essentiellement des cations adsorbés qui jouent un rôle majeur dans les phénomènes d'agrégation (§ 5.1) en constituant ce qui est parfois appelé des « ponts cationiques » entre les particules.

Agrégées par le phénomène d'adsorption, les particules élémentaires de la terre sont floculées (§ 2.2.1 f). Pour réaliser une analyse granulométrique, il faut donc les disperser ou les défloculer.

En pratique, l'objectif est de les placer dans une situation où le risque de floculation est le plus faible possible. Pour cela, par lavages successifs, tous les cations adsorbés sont remplacés par le plus faiblement floculant d'entre eux, l'ion Na^+ . Après un traitement avec HCl , un ajout de NaOH aura le double effet de neutraliser les ions H^+ et d'apporter Na^+ . L'utilisation de l'hexamétaphosphate de sodium $(\text{NaPO}_3)_6$ permet de compléter (parfois aussi de remplacer) l'action de l'hydroxyde de sodium grâce au volumineux anion hexamétaphosphate qui contribue à neutraliser les quelques sites positifs qui existent (§ 2.2.1).

La dispersion est améliorée par une agitation mécanique dans l'eau, qui aide à briser les agrégats. Celle-ci est éventuellement amplifiée par l'émission d'ultrasons, dans le cas de terres très argileuses ou d'échantillons d'Andosols (§13.3.10 a).

Les étapes conduisant à la destruction des agrégats et à la dispersion des particules minérales élémentaires sont récapitulées dans la figure 2.1.

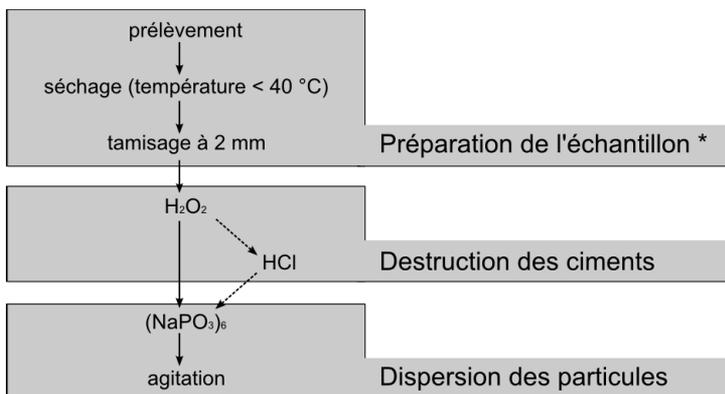


Figure 2.1 – Schéma simplifié de l'organisation de la séparation des particules élémentaires pour une analyse granulométrique.

(* étape commune à la plupart des protocoles d'analyses de terre)

c) Discussion

La question cruciale reste celle de la décarbonatation. Si, dans le cas de terres non carbonatées l'incidence de ce prétraitement est bien évidemment nulle, il n'en va pas de même pour les terres calcaires (tableau 2.1).

Tableau 2.1 – Rapport entre les quantités d'argile granulométrique (§ 2.1.2) obtenues avec et sans décarbonatation, selon l'origine de la terre analysée (d'après Hénin, 1976).

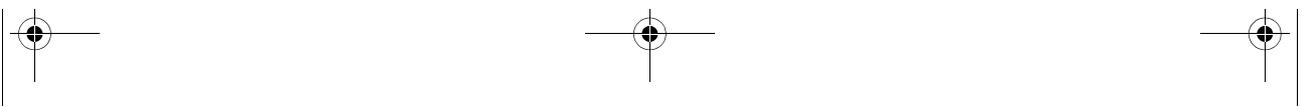
Types de terre	$\frac{\text{Argile sans décarbonatation}}{\text{Argile avec décarbonatation}} \cdot 100$
Terre granitique	100
Terre « à brique »	100
Argile à silex	98
Marne blanche	88
Lœss calcaire	80
Marne verte	73
Terre latéritique	38

Lors de la décarbonatation, outre les ciments carbonatés, toutes les particules calcaires sont détruites, quelle que soit leur taille. Il en est de même pour certaines pseudo-particules des matériaux latéritiques (photographie 19), cimentées par des oxydes solubles en milieu très acide. La disparition de ces particules qui, par leur taille, jouent un rôle non négligeable dans le comportement physique du sol, biaise donc le commentaire sur ce comportement issu du résultat de l'analyse granulométrique. Par ailleurs (§ 2.2), la taille d'une particule n'est pas suffisante pour renseigner sur la totalité de ses propriétés, surtout en ce qui concerne les particules les plus fines : le comportement d'une argile minéralogique (§ 2.2.1) a très peu en commun avec celui d'une particule de calcaire ayant la même taille. Détruire les carbonates permet donc de connaître avec plus de précision la quantité de ces « vraies » argiles présentes dans l'échantillon, celles qui sont les plus déterminantes pour de nombreuses propriétés du sol (CEC, structure...). En ce sens, la décarbonatation est justifiée.

Ainsi, le choix d'un protocole avec ou sans décarbonatation dépend avant tout de la raison pour laquelle l'analyse granulométrique est réalisée. Pour étudier un comportement directement dépendant de la taille des particules, il faut l'éviter, pour évaluer une propriété en lien avec la réactivité physico-chimique des constituants, une décarbonatation préalable est préférable. Enfin, s'il s'agit de travailler sur des propriétés spécifiquement liées aux carbonates, d'autres analyses sont plus pertinentes (pH, calcaire total ou calcaire actif).

2.1.2 Répartition par classes de dimension

Donner une distribution de la taille des particules d'un échantillon nécessite de raisonner par « classes » de dimensions dans lesquelles seront réparties la totalité



des particules. La première question à résoudre est alors de choisir les limites de ces classes, puis de déterminer des méthodes de tri adaptées aux tailles retenues. La signification du résultat et sa qualité dépendent des réponses apportées à ces deux questions.

a) Choix des limites

Les limites généralement retenues pour les analyses granulométriques de terre ont été proposées par le suédois Atterberg et admises par l'Association Internationale de Science du Sol lors de son congrès de 1930 :

- 2 000 μm : au-delà de cette taille, on peut considérer que la plupart des particules sont polyminérales et qu'elles n'ont que de faibles liens avec l'eau du sol : ce sont les éléments grossiers. Cette limite est retenue pour séparer la terre fine, sur laquelle portent exclusivement les analyses de terre classiques.
- 200 μm : en deçà de cette taille, les particules peuvent être agrégées par les forces de capillarité, résultat de la présence d'eau dans les interstices existant entre elles : on peut faire un « château de sable ».
- 20 μm : correspond à peu près au diamètre des poils absorbants des racines des plantes.
- 2 μm : en deçà de cette taille, les particules présentent des propriétés colloïdales.

À ces limites, a été ajoutée ultérieurement celle de 50 μm qui correspond à la taille maximale de particules pouvant être transportées sur de longues distances par un vent de vitesse moyenne ($10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Cela correspond aux conditions de mise en place des dépôts lœssiques périglaciaires à partir desquels se sont développés des sols qui constituent aujourd'hui une très grande part des meilleures terres agricoles à travers le monde.

Ces limites sont justifiées par des caractéristiques des particules qui sont bien en lien avec certains de leurs comportements chimiques ou physiques. Ainsi, malgré l'extrême amplitude de cette gamme (si la limite la plus fine correspondait à une bille d'enfant, la plus grosse serait une montgolfière), il est tout à fait cohérent de considérer que le résultat de cette analyse granulométrique fournira une information globale pertinente sur le comportement de la terre analysée.

Ces limites permettent de définir des classes granulométriques correspondant à l'argile, aux limons et aux sables (figure 2.2).

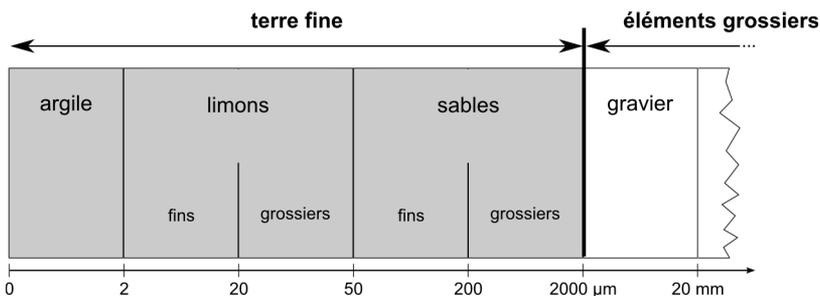


Figure 2.2 - Dénomination des différentes classes granulométriques.

Cependant, on ne manquera pas de noter l'ambiguïté de ces termes qui peuvent recouvrir plusieurs réalités : c'est ainsi que le mot argile peut désigner une fraction granulométrique (la fraction des particules inférieures à 2 μm), une famille de minéraux (argiles minéralogiques, § 2.2.1) ou même une roche (une argile, une « argilite »). Le mot limon est également utilisé par les géologues pour désigner des formations superficielles dont la composition granulométrique est loin d'être toujours à dominante limoneuse. Le mot sable a lui-même un sens assez large, mais souvent plus proche des sables grossiers.

Si elles sont largement reconnues et utilisées à travers le monde, ces limites ne sont pas les seules. La limite des limons à 50 μm est dans certains pays (Autriche, Allemagne...) remplacée par un seuil à 63 μm : cela ne change quasiment rien quant au résultat obtenu et se justifie par des raisons pratiques liées au matériel disponible pour effectuer le tamisage nécessaire à la séparation des fractions. Il serait cependant utile qu'une harmonisation intervienne à ce niveau. Par ailleurs, dans d'autres domaines comme la sédimentologie ou la géotechnie, par exemple, les propriétés de la terre que l'on cherche à mettre en évidence par une analyse granulométrique ne sont pas les mêmes que celles qui priment en pédologie ou en agronomie, les limites retenues sont donc, logiquement, différentes.

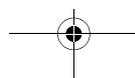
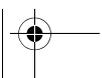
Enfin la taille d'une particule ne préjuge en rien de sa forme. Pourtant certains de leurs comportements (§ 2.2.1) peuvent être influencés par ces aspects géométriques. Dans le cadre de l'analyse granulométrique, qui se déroule en milieu liquide, toutes les particules sont englobées par quelques molécules d'eau qui forment, grosso modo, une sphère dont le diamètre est proche de la plus grande dimension de la particule. Dès lors, pour les étapes suivantes de cette analyse, nous considérerons les particules comme des sphères. Cette hypothèse est acceptable étant donné la précision de l'ensemble de la démarche. C'est pour les argiles minéralogiques, qui sont en fait des plaquettes, que l'écart entre la forme réelle et la forme admise est le plus sensible. Dans ce cas, pour aborder avec une grande précision le comportement physico-chimique de ces constituants, il faudrait combiner la mesure de leur surface spécifique (§ 2.2.1) à la prise en compte de leur nature minéralogique, ce qui est beaucoup plus compliqué et ne se justifie que dans des cas particuliers. Cette approche peut aussi parfois être simplifiée en considérant la fraction la plus fine des argiles granulométriques, < 0,2 μm (§ 13.1.3 et 13.3.3).

b) Tri dimensionnel des particules

Classiquement, deux méthodes complémentaires servent pour trier les particules élémentaires de terre : le tamisage et la sédimentation. Plus récemment, se sont développées des techniques utilisant un rayonnement laser.

• *Tamisage*

La fiabilité du tri effectué par un tamis est fonction de l'homogénéité de la taille de ses trous et des risques de rétention des particules sur le tamis par des forces



électrostatiques. Ces exigences ont conduit aux règles suivantes pour que le tamisage se déroule dans des conditions fiables et reproductibles :

- les tamis doivent avoir des mailles rondes pour des raisons liées à la probabilité de passage des particules non sphériques¹ ;
- cependant, en dessous de 1 mm, pour des raisons de fabrication de tamis homogènes, on préfère des mailles carrées ;
- pour éviter que les particules ne soient retenues trop fortement par le tamis, on n'utilise pas le tamisage pour les limites inférieures à 50 μm .

• *Sédimentation*

Le tri des particules par sédimentation repose sur le fait que, si certaines conditions sont respectées, la vitesse de chute d'une particule dans un fluide est uniquement fonction de sa dimension. D'après les termes de la loi de Stokes, notamment, les conditions pour que les résultats soient fiables sont les suivantes :

- La viscosité du fluide (l'eau) ne doit pas varier au cours de la mesure. La viscosité étant très sensible aux variations de température, il importe de travailler à température constante. En pratique, cette phase de l'analyse granulométrique se déroule dans des locaux thermostatés à 20 ± 1 °C.
- Toutes les particules doivent avoir la même densité. Cela est supposé vérifié si toute la matière organique (très légère) a bien été détruite. Dans le cas contraire, non seulement les particules élémentaires risquent de ne pas être totalement séparées mais encore l'hétérogénéité de leur densité biaise la relation entre la taille des particules et leur vitesse de chute.
- L'écoulement des particules doit rester laminaire. En effet, si la chute est trop rapide, des turbulences vont se produire et rendre impossible la mesure de la distance réelle parcourue lors de la sédimentation. En pratique, au-delà de 50 μm , il est difficile d'être sûr de la qualité de la sédimentation.

Il y a donc bien complémentarité entre le tri par tamisage et le tri par sédimentation pour l'analyse granulométrique.

Plusieurs techniques permettent de déterminer la quantité de particules présentes dans chacune des classes granulométriques séparées par sédimentation : le prélèvement à la pipette de Robinson, le suivi de la densité de la suspension, la pesée en continu de la quantité sédimentée (figure 2.3).

c) Granulométrie laser

La granulométrie laser est basée sur un décompte direct de chaque particule élémentaire, avec mesure de sa taille. Pour cela, la suspension passe devant un rayon laser diffracté par les particules, en fonction de leur taille, mais aussi de leur forme et de leur nature. L'analyse des modifications du rayonnement initial à l'aide de modèles mathématiques permet de reconstituer la composition granulométrique de l'échantillon étudié.

1. Par définition, la terre fine correspond à l'ensemble des particules passant à travers un tamis à mailles rondes de 2 mm de diamètre.

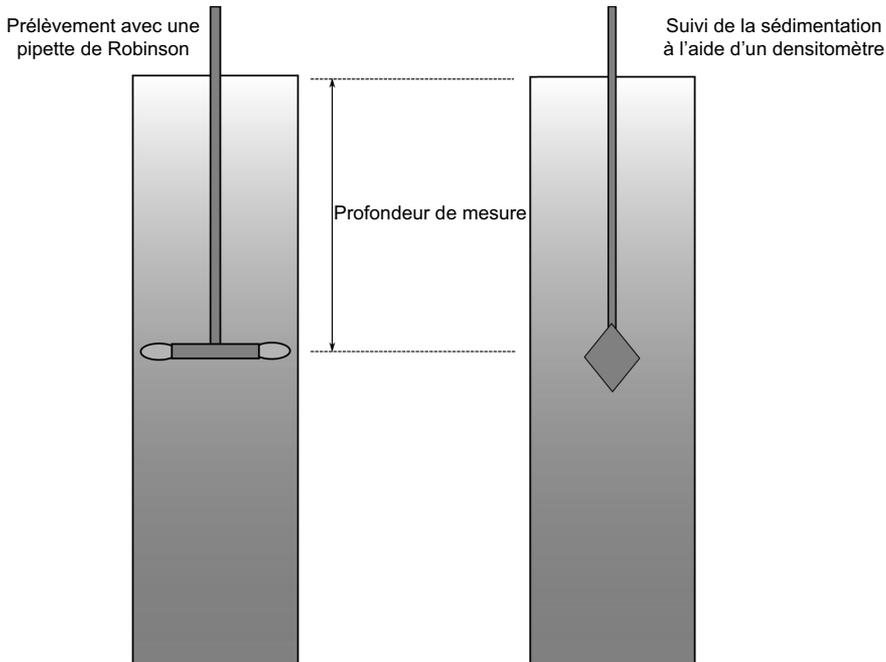


Figure 2.3 - Exemples de prélèvement des classes granulométriques séparées par sédimentation.

Cette méthode a l'avantage de la simplicité et de la rapidité. Elle est utilisée dans de nombreux domaines allant de la pharmacie à l'étude des matériaux. En ce qui concerne les sols, les modalités étant différentes, les résultats peuvent parfois être assez différents de ceux obtenus par sédimentation ; de plus, cet écart varie selon les types de sols. Il faut donc utiliser cette méthode avec prudence, et ne pas y recourir sans précaution pour remplacer l'analyse par sédimentation, encore moins en déduire une texture ou regrouper des résultats obtenus par les deux méthodes.

2.1.3 Expression des résultats

Ce sont donc cinq classes granulométriques qui sont le plus souvent utilisées pour décrire la composition de la terre fine. Si certaines classes peuvent parfois être subdivisées, notamment les argiles, les deux fractions de limons ou de sables sont fréquemment regroupées pour ne conserver que les trois classes principales.

Les résultats sont habituellement exprimés par rapport à l'échantillon de départ, en pourcentage de la masse de terre fine sèche¹. Ils peuvent aussi être exprimés en pour mille, ou grammes par kilo ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$). Les teneurs en matières organiques et en carbonates (s'ils ont été détruits) doivent donc être ajoutées pour retrouver la totalité

1. L'analyse est conduite à partir d'un échantillon simplement séché à l'air. L'humidité résiduelle est mesurée à l'aide d'un second échantillon passé à l'étuve à 105 °C, ce qui permet de corriger la masse de l'échantillon de départ.

de l'échantillon initial. Mais pour comparer entre elles des analyses différentes, il est préférable de ramener à 100 % la somme des cinq fractions granulométriques (figure 2.4) ; c'est ainsi que la plupart des laboratoires présentent les résultats. Ce calcul est indispensable pour représenter l'échantillon sur un « triangle de texture » (figure 2.6) ou si l'on souhaite utiliser une fonction de pédotransfert (§ 2.3.2) nécessitant une donnée granulométrique.

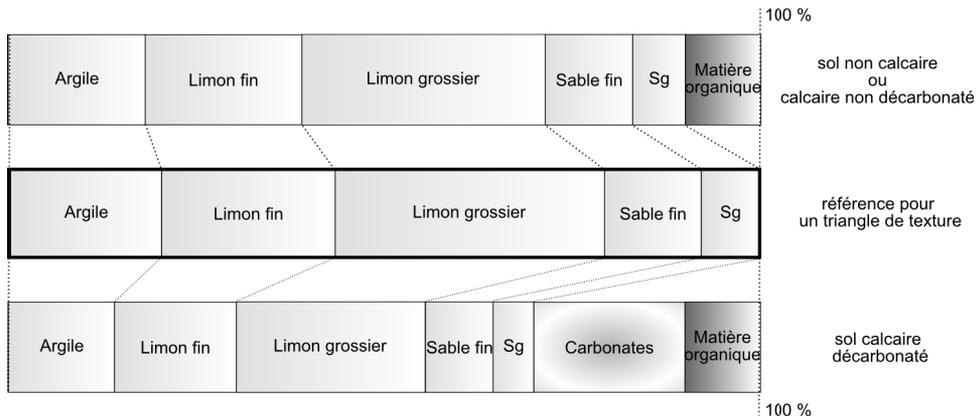


Figure 2.4 - Différents systèmes de référence utilisés pour exprimer un résultat d'analyse granulométrique.

Par ailleurs, en admettant que les carbonates se répartissent équitablement entre les cinq fractions granulométriques (hypothèse arbitraire de la figure 2.4), les résultats exprimés en « pourcentages 5 fractions » seront identiques avec ou sans décarbonatation. En réalité, c'est rarement le cas et, de plus, la granulométrie des carbonates peut varier fortement selon les types de sols. Les résultats avec et sans décarbonatation sont bel et bien différents.

a) Représentations graphiques des résultats

Les résultats d'analyses granulométriques peuvent être représentés sous forme de graphiques afin de comparer facilement les caractéristiques de plusieurs échantillons, ou de suivre l'évolution de la granulométrie au sein d'un profil de sol (figure 2.5).

b) Triangles de texture

Les triangles de texture ont été conçus pour relier certaines des propriétés d'un échantillon de terre, jugées tactilement sur le terrain et correspondant à sa texture, à son analyse granulométrique, issue du laboratoire. Il faut cependant noter que cette évaluation est faite pour un échantillon sans matière organique, alors qu'une texture *stricto sensu*, appréciée manuellement sur le terrain, en tient compte. La plupart du temps, quand la teneur en matière organique est inférieure à $50 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, la différence est peu perceptible. Dans les autres cas, il convient d'être prudent.

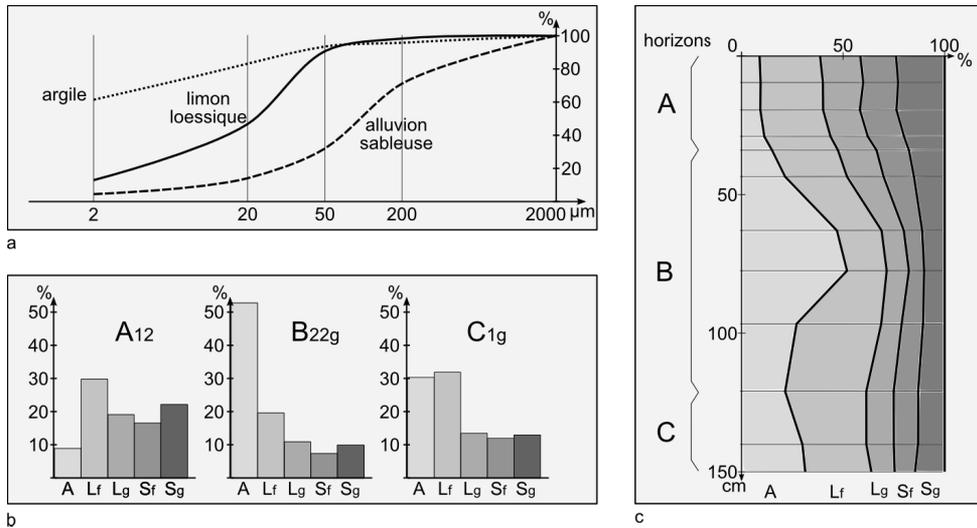


Figure 2.5 - Exemples de représentations graphiques d'analyses granulométriques (a : courbes cumulatives ; b : histogrammes ; c : profil pédologique).

Il s'agit de représenter sur ces triangles la position de tout échantillon en fonction des trois classes granulométriques principales. Les triangles équilatéraux comportent un axe pour chacune de ces grandes classes (argile, limons et sables) : si le total des pourcentages est bien 100, la représentation d'un échantillon correspond à un point du triangle (figure 2.6). Inversement, chaque point correspond à une répartition unique entre chacune de ces trois classes. Cette représentation est souvent remplacée par un triangle rectangle isocèle comportant seulement deux axes (argile et limons) ; les sables étant le complément à 100 %.

En outre, la surface des triangles est découpée « à dire d'experts » en zones (ou classes texturales) dans lesquelles les échantillons correspondants présentent, au diagnostic manuel, des comportements voisins. La subjectivité d'un tel travail de découpage d'un continuum, les nuances de comportement selon des contextes pédologiques régionaux ont conduit à des zonages différents du triangle dans le monde et selon les auteurs (§ 2.3.1, figure 9.7). Chaque classe texturale est associée à un intitulé (tableau 2.2) qui, après « étalonnage » tactile (Baize et Jabiol, 1995), peut être affecté à un échantillon de terre lors d'un diagnostic de terrain.